

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**ANALISIS COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES MEDIANTE LAS ALTERNATIVAS: IMT-PAVE Y CR-ME DEL
METODO MECANICISTA EMPIRICO, CON EL METODO AASHTO 93**

PRESENTADO POR:

ANGEL BALTAZAR GARCÍA VARGAS

FELIPE ALBERTO GUTIÉRREZ ROMERO

JOSUÉ DAVID HERNÁNDEZ SORIANO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2014.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

PhD. ING. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO CIVIL

Título :

**ANALISIS COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES MEDIANTE LAS ALTERNATIVAS: IMT-PAVE Y CR-ME DEL
METODO MECANICISTA EMPIRICO, CON EL METODO AASHTO 93**

Presentado por :

**ANGEL BALTAZAR GARCÍA VARGAS
FELIPE ALBERTO GUTIÉRREZ ROMERO
JOSUÉ DAVID HERNÁNDEZ SORIANO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:
Docentes Directores :

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA
ING. DILBER ANTONIO SANCHEZ VIDES
MSc. ING. RAMON FRITZ ALVARADO GLOWER**

San Salvador, Septiembre de 2014.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. DILBER ANTONIO SANCHEZ VIDES

MSc. ING. RAMON FRITZ ALVARADO GLOWER

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS TODOPODEROSO** por bendecirnos, protegernos e iluminarnos en este camino que un día decidimos emprender y que hoy estamos culminando con éxito, los obstáculos fueron muchos, pero en su infinita misericordia Dios tenía un plan perfecto y nos regaló sabiduría e inteligencia para buscar una solución a cada uno de ellos y sacar adelante nuestro Trabajo de Graduación.

A nuestra querida e inolvidable **Alma Mater Universidad de El Salvador** por formarnos, capacitarnos y proveernos del conocimiento necesario para enfrentar el diario vivir como Profesionales y de esta manera colaborar y aportar en el desarrollo de nuestro País.

A la **Escuela de Ingeniería Civil** por forma parte de nuestra formación académica como profesionales de la Ingeniería Civil.

A la empresa **ASFALCA** por su colaboración y apoyo de manera desinteresada durante el desarrollo de nuestro Trabajo de Graduación, a través de información actualizada, asesoría técnica, proporcionamiento de materiales, equipo de laboratorio e instalaciones.

Al Viceministerio de Transporte de El Salvador (**VMT**) por otorgarnos a través de la Casa de la Transparencia, la información de los registros de pesajes de vehículos pesados.

A los diferentes Profesionales de la Universidad de El Salvador y de la empresa ASFALCA, que con su valiosa colaboración enriquecieron este trabajo brindándonos su apoyo para la elaboración de este trabajo de graduación, especialmente a:

Ing. Dilber Antonio Sánchez Vides.

Ing. Mauricio Ernesto Valencia.

PhD. Edgar Armando Peña.

Ing. José Ranulfo Cárcamo y Cárcamo.

Ing. Jorge Rivera Flores.

MSc. Ing. Ramón Fritz Alvarado Glower

Ing. Paulina Leiva Padilla (Investigadora Lanamme UCR)

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar Ph.D. (LanammeUCR)

Ing. Roberto Hernández Domínguez (Investigador en Infraestructura del Transporte, Instituto Mexicano del Transporte).

Ing. Paul Garnica (Instituto Mexicano del Transporte).

Ing. Pablo Torres.

Además, nuestros agradecimientos especiales para aquellas personas que colaboraron incondicionalmente que de una u otra manera, ayudándonos durante el desarrollo de nuestro Trabajo de Graduación.

Personal Técnico de Laboratorios ASFALCA

A nuestros amigos y futuros colegas que contribuyeron en la realización de nuestro Trabajo de Graduación.

Ing. Carlos Campos Cruz.

Ing. Adriana Castro.

Ing. Carmen Castro.

Ing. Rafael Blanco.

Ing. Manuel Guzman.

Ing. Walther Rios.

Ing. Oscar Noyola.

Sigan adelante, toda lucha tiene su recompensa, *Muchas gracias por TODO Colegas.*

Sin la valiosa colaboración de cada uno de ustedes no habría sido posible llegar a la meta y cumplir con los objetivos trazados en nuestro Trabajo de Graduación. *Muchas Gracias por TODO.*

DEDICATORIA

Al final del sendero lo único que puedo decir es que entramos muchos y salimos pocos Este es el primer gran logro en mi vida y pues es un sueño hecho realidad ser profesional y ser titulado como INGENIERO CIVIL, estar en este punto de mi vida he vivido cada uno de los momentos que estuve como estudiante y como investigador en mi tesis, Es un esfuerzo más que grande una lucha sin parar nunca darme por vencido ha sido mi lema y seguirá siendo y con muy justa razón puedo decir **LO HE LOGRADO.**

A DIOS TODOPODEROSO, por regalarme sabiduría y la inteligencia necesaria para culminar con éxito mi carrera profesional, eres lo máximo Dios, tu fidelidad es grande y tu misericordia es eterna, gracias por estar conmigo en todo momento, gracias por regalarme la vida, cuidarme y protegerme durante todo este tiempo de estudio, gracias por demostrarme que tus promesas son reales ya que tú eres el principal hechor de este logro, toda la honra y gloria sea para ti mi DIOS.

A MI MADRE y PADRE, **Julia Soriano Y Rubén Hernández** por todo el apoyo y los consejos durante mis años de estudio, gracias padres por ser sabios, agradezco a Dios por regalarme una mujer virtuosa y un padre responsable y que dieron todo para que yo sea lo que soy les dedico este triunfo que es de ustedes.

A TODOS MIS FAMILIARES, especialmente a mi Tío **Pedro Soriano** que gracias a su consejo y sus ánimos a ser profesional tuvieron un gran impacto en mi vida, a mis HERMANOS (**Diego, Rubén, Raquel, Joel, Eleazar** que aunque estés lejos viejo siempre estás aquí) a mi Tío **Inés Soriano** que contribuyo con sus palabras y sus ánimos para este éxito.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS, **Ángel y Felipe** porque hemos superado todos los obstáculos que se nos presentaron en el Trabajo de Graduación, la verdad mejor equipo no pude haber tenido, gracias por vivir conmigo esta aventura, gracias por tenerme paciencia y por su amistad, Felicidades colegas lo logramos!!!

A MIS AMIGOS Y HERMANOS **Carlos Campos (Tuza), Carmen Castro (Mom), Adriana Castro (Manguita), Francisco Renderos (Cara de sueño), Manuel Guzmán (Cuchumbo), Walther Ríos (Moreno), Rafael Sánchez (Puro Hueso), Roberto Chicas (La Chica), Edwin Ventura (Wito), Fernando Gálvez (Frodo), Allan Artiga (Serpentor), Juan Delgado (Joanillo), Joel (Shoel), Ledy Esquivel, Reynaldo Nieto, Carito, Yessica, Orlando, Catalina Pacas Santamaria (Kta) y a su Abuelita, Mónica Aguilar (mi compañera amiga y ayudante), Oscar Noyola (Panchi) GRACIAS A TODOS POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO.**

A TODO EL STAFF DE DOCENTES, que en algún momento formaron parte de mi proceso como Profesional, gracias por compartir conmigo sus valiosos conocimientos, desde mis profesores de Preparatoria, Educación Básica, Educación media, Educación Superior, **Ing. Mauricio Valencia, Ing. Edgar Gavidia, Ing. Dilber Sánchez, Dr. Edgar Peña, Ing. Ranulfo Cárcamo, Ing Fritz Glower**, quedo totalmente agradecido con ustedes, gracias por su amistad y apoyo.

Josué Hernández

DEDICATORIA.

“Después de una gran batalla, queda la celebración de los victoriosos”, ésta ha sido una lucha constante sin tregua alguna, para poder culminar con éxito, uno de mis más anhelados sueños, culminar mi carrera profesional. Dentro y fuera de la Alma Mater, quedan muchos recuerdos y experiencias a lo largo de toda la carrera, con muchos compañeros y amigos que fueron parte importante de mi crecimiento profesional.

Gracias a **DIOS TOPODEROSO**, por haber estado a mi lado, fortaleciéndome, guiándome y regalándome la inteligencia para poder asimilar todos los conocimientos necesarios para poder avanzar en mis estudios.

Gracias a mi padres, mi Madrecita (**Josefina Vargas**), por ser mi consejera, mi mejor amiga, mi gran compañera en cada etapa de mi vida, por ser una mujer luchadora, mi gran ejemplo a seguir, mi padre (**Ángel García, QEPD**) en memoria del mejor papá del mundo quien estoy seguro que desde el cielo me está apoyando, y su gran sueño de ver a sus hijos como profesionales se está haciendo realidad.

A toda mi familia, a cada uno de ellos, mis hermanos(as) (Tere, Juan Ramón, Max, Miriam, Maribel, Mario, Vilma, Fini, Pedro y Gladita), a cada uno de ellos, gracias por ser mi gran apoyo, por estar siempre a mi lado, sin importar las circunstancias, a la vez me siento bendecido por tenerlos a mi lado.

A todos mis amigos(as) a lo largo de mi carrera que sería difícil mencionarlos a todos, los que de una u otra manera fueron parte fundamental, en la aventura de cursar cada materia, y sus particularidades: Oscar Noyola (Panchi), Carlos Pérez, Guillermo Rivas , Roberto Zelada, Najera, Migue, Sergio, Krisia, Samuel Casco (Suchi), Efra, Ever, Jaime Sunzín, Nely, Carlos Guzman, Ledy Esquivel, Reynaldo Díaz, Glenda, Nerio, Fran (Juárez, Cisneros, Renderos, Ferrer, Burgos), Carito, Yessica, Dennis. Los que no aparezcan acá, pero que igualmente saben que se les aprecia, al igual a todos los que sin ser compañeros de Universidad me han acompañado siempre.

A mi maestra de Inglés PhD Meredith Mariana Hermance y su esposo Jeff (thanks for supporting me throughout my studies, and believe in my dreams)

A mis compañeros de tesis, Josué y Felipe, con quienes tengo el honor de culminar con éxito mi carrera, gracias por echarle ganas, y a darle para adelante como excelentes profesionales.

A TODO EL STAFF DE DOCENTES, que formaron parte de mi proceso como Profesional, gracias por compartir sus valiosos conocimientos, desde mis profesores de Preparatoria, Educación Básica (Prof Max, Prof Chicky....), Educación media (Prof Elmer, Señor Yami....), Educación Superior, mis asesores de tesis, **Ing. Mauricio Valencia, Ing. Dilber Sánchez, Ing Fritz Glower, Ing Ph.D Edgar Peña, Ing. Ranulfo Cárcamo, Ing. Lesly, Ing Rivera, y demás planta docente**, estoy totalmente agradecido con ustedes, gracias por todo su apoyo.

Angel García.

DEDICATORIA

En primer lugar **A DIOS TODOPODEROSO** por todos los momentos que hasta ahora he pasado los cuales han servido para lograr ser lo que hasta ahora soy, por darme salud, paciencia para los momentos estresantes, sabiduría en los momentos de incertidumbre, por la fortaleza para superar los momentos difíciles, por la bendición más grande que alguien puede tener que es la familia a los cuales siempre los has cuidado, por las personas que has puesto en mi camino y que se han ganado mi respeto y amistad, por cruzar mi camino con el amor y gracias por permitirme lograr superar una prueba más en mi vida.

A MIS PADRES por formar la familia que somos, por todos los momentos difíciles que hemos pasado juntos que al recordarlos a estas alturas nos provocan sonrisas, por ser unos padres inigualables que siempre pensaron primero en sus hijos antes de alguien más, gracias por regalarme la vida. “Son los mejores del mundo”.

A mi madre **REINA ISABEL ROMERO** por ser una madre ejemplar que lucha siempre por sus hijos, por todo el amor que me ha dado y la confianza que ha depositado en mi, gracias por darme la vida y estar conmigo y mis hermanos en todo momentos, gracias por los momentos de disciplinas que fueron opacados por tu inmenso amor y siempre estaré a tu lado. “Gracias Por Creer En Mi”.

A mi padre **JOSE ROBERTO GUTIERREZ** por ser el mejor padre del mundo, por todo el amor que siempre me has dado a mi y mis hermanos, por tus muchas enseñanzas y tu sabiduría, gracias por tu comprensión y confianza, por seguir esforzándote por tus hijos y creer en todos nosotros que saldremos adelante y siempre estaré a tu lado. “Estoy Orgulloso De Ti”.

A MI HERMANA Y HERMANOS, que siempre hemos sido unidos en los buenos y malos momentos, por compartir momentos difíciles que nos han hecho llorar así como otro en los que no podemos parar de reír, gracias por siempre apoyarme, escucharme y comprenderme, porque de una u otra forma aprendo de ustedes. “Gracias por todo”.

A mi novia **YENCI RAQUEL SIBRIAN HERNANDEZ**, que desde que nos conocimos hemos luchado juntos para salir adelante, gracias por creer en mi, por la confianza y paciencia que me has

dado, por darme otra razón mas para salir adelante, gracias por estar a mi lado y que justos superaremos todo. “Gracias Por Entrar En Mi Vida”.

A mi mejor amiga **SUSANA LOPEZ RAMIREZ**, que fue una gran influencia para la elección de mi carrera, gracias por brindarme tu amistad y confianza, por comprender y escuchar, gracias por todo. “Siempre Confiare En Ti”.

A mis **AMIGOS DE LA UNIVERSIDAD** que fueron los únicos que saben por todo lo que hemos pasado para lograr este objetivo, gracias por los momentos de desvelo al igual que los momentos de diversión, por todos los momentos difíciles que me ayudaron a superar; todos ustedes se ganaron mi respeto y amistad. Gracias en especial a los que pertenecemos al grupo de “**LOS TAMIZADOS**” (Frank, Burgos, Pablo, Elder, etc.). “Gracias Amigos”.

A mis compañeros de tesis: **ÁNGEL BALTAZAR Y JOSUE HERNÁNDEZ**, con quienes estoy dando los últimos pasos en la universidad, les agradezco por todos esos momentos buenos y malos; los cuales hemos superado, gracias por aclarar todas mis dudas y compartir su sabiduría, gracias por todo y espero que todos salgamos adelante. “Al Fin Terminamos”

A los ingenieros que formaron parte de los docentes asesores: **ING. MAURICIO ANTONIO VALENCIA, ING. DILVER ANTONIO SÁNCHEZ é ING. FRITZ GIOWER ALVARADO**; gracias por todas las dudas aclaradas, por creer en nuestro grupo de tesis, por el conocimiento que nos han transmitido, por darnos parte de su valioso tiempo para que nuestro grupo pudiera terminar este trabajo de graduación. “Gracias Por Su Confianza”.

A **TODOS LOS DOCENTES** que formaron parte de mi formación académica, gracias por toda su paciencia y comprensión, por su amistad y confianza, gracias por todas las pruebas que fueron difícil de superar pero sirvieron de mucho, gracias por todo el conocimiento transmitido. “Todos Se Ganaron Mi Respeto”

Felipe Alberto Gutiérrez Romero

INDICE

CAPITULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 ANTECEDENTES	3
1.2.1 DESARROLLO HISTÓRICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS	3
1.2.2 METODOS DE DISEÑO BASADOS EN EXPERIMENTOS VIALES. (ROAD TEST)	4
1.2.3 EVOLUCION DEL METODO AASHTO	5
1.2.4 METODO AASHTO-MEPDG.....	6
1.2.5 ALTERNATIVAS DE DISEÑO BASADOS EN AASHTO-MEPDG	8
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.4 OBJETIVOS.....	11
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	11
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.5 ALCANCES.....	12
1.6 LIMITACIONES	13
1.7 JUSTIFICACIÓN	14
CAPITULO II: CONCEPTOS MECANICISTAS Y DESCRIPCION DE LAS ALTERNATIVAS IMT-PAVE, CR-ME Y EL METODO AASHTO 93.	15
2.1 CONCEPTOS MECANICISTAS EN PAVIMENTOS.....	16
2.1.1 CONTENIDO DE LAS METODOLOGÍAS MECANICISTAS	16
2.1.2 VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO MECANICISTA-EMPÍRICO	17
2.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS METODOLOGÍAS MECANICISTAS.....	18
2.1.3.1 <i>MODELO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO</i>	18
2.1.3.2 <i>ESTRUCTURAS Y COMPONENTES DEL DISEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO.....</i>	19
2.1.3.2.1 <i>COMPONENTES DE ENTRADA.....</i>	20
2.1.3.2.2 <i>CÁLCULO DE RESPUESTAS ESTRUCTURALES.....</i>	20
2.1.3.2.3 <i>CÁLCULO DEL NIVEL DE DAÑO.....</i>	21
2.1.4 FACTORES DE ENTRADA AL PROCESO DE DISEÑO MECANICISTA	22
2.1.4.1 <i>TRÁNSITO VEHICULAR</i>	22
2.1.4.2 <i>CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....</i>	24
2.1.4.3 <i>FACTORES CLIMÁTICOS.....</i>	26
2.1.5 ANÁLISIS MECANICISTA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	26
2.1.5.1 <i>MODELOS DE DETERIORO</i>	26
2.1.5.2 <i>MODELOS DE REGULARIDAD SUPERFICIAL.....</i>	30
2.2 MÉTODO AASHTO 93.....	30

2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	30
2.2.2 VARIABLES DE DISEÑO	33
2.2.2.1 VARIABLES EN FUNCIÓN AL TIEMPO	33
2.2.2.2 VARIABLES EN FUNCIÓN DEL TRÁNSITO.....	34
2.2.2.2.1 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES.....	35
2.2.2.2.2 DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO	36
2.2.2.2.3 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR DIRECCIÓN	40
2.2.2.2.4 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL.....	41
2.2.2.3 CONFIABILIDAD (R)	41
2.2.2.3.1 CRITERIOS PARA DETERMINAR LA SERVICIABILIDAD.....	42
2.2.2.4 DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S _o)	44
2.2.2.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	45
2.2.2.5.1 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS SUELOS PARA SUBRASANTE.....	46
2.2.2.5.2 ENSAYOS DE SUELOS	47
2.2.2.6 DRENAJES	50
2.2.2.6.1 EFECTOS DEL AGUA SOBRE EL PAVIMENTO	51
2.2.2.6.2 SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS DE HUMEDAD EN PAVIMENTOS	51
2.2.2.6.3 CONSIDERACIONES DE DRENAJE EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	52
2.2.2.6.4 COEFICIENTES DE DRENAJE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (M _x).....	53
2.2.2.7 COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA.....	58
2.2.3 DETERMINACIÓN DE ESPESORES.....	62
2.2.3.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO.....	62
2.2.3.2 ESTABILIDAD Y FACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN	64
2.2.3.3 ESPESORES MÍNIMOS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL	65
2.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO IMT-PAVE	68
2.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA IMT-PAVE	68
2.3.2 VARIABLES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE EL IMT-PAVE.....	69
2.3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	71
2.3.3.1 PARÁMETROS DE ENTRADA AL IMT-PAVE.....	71
2.3.3.2 TRANSITO.....	71
2.3.3.3 DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TRANSITO	72
2.3.3.3.1 TPDA (VEHÍCULOS/DÍA)	72
2.3.3.3.1 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR SENTIDO (FDS)	72
2.3.3.3.2 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL (FDC).....	72
2.3.3.3.3 HORIZONTE DE PROYECTO	73
2.3.3.3.4 VIDA (AÑOS)	73
2.3.3.3.5 TASA DE CRECIMIENTO (%).....	73
2.3.3.3.6 CLASIFICACIÓN VEHICULAR	73
2.3.3.4 GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA	74
2.3.3.4.1 NIVEL DE CARGA	74
2.3.3.5 ANALISIS ESPECTRAL	78
2.3.4 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	78

2.3.4.1 MATERIALES GRANULARES: (BASE, SUBBASE Y SUBRASANTE)	79
2.3.4.2 CARPETA ASFÁLTICA	82
2.3.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA	83
2.3.6 MODELOS DE DETERIOROS	84
2.3.6.1 FATIGA	84
2.3.6.2 DEFORMACIÓN PERMANENTE	84
2.3.7 ESPECTROS DE DAÑO	85
2.3.7.1 ESPECTROS DE RESPUESTA	86
2.3.7.2 ESPECTRO DAÑO-FATIGA	86
2.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO CR-ME	87
2.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA DEL CR-ME	87
2.4.2 VARIABLES QUE AFECTAN EL DISEÑO	87
2.4.2.1 CLIMA	87
2.4.2.2 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	89
2.4.2.2.1 CAPA DE RODADURA	89
2.4.2.3.1.1 MÓDULO RESILIENTE	90
2.4.3 VARIABLES DE ENTRADA	92
2.4.3.1 DESCRIPCIONES GENERALES DEL PROYECTO	94
2.4.3.2 TIPO DE ANÁLISIS	95
2.4.3.2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	97
2.4.3.3 CALCULO DE ESPESORES METODOLOGÍA AASHTO 93	100
2.4.3.4 MÓDULO DE CLIMA	101
2.4.3.5 MÓDULO DEL TRÁFICO	104
2.4.3.6 MÓDULO DE EFECTOS DE TEMPERATURA EN LA MEZCLA ASFÁLTICA/CURVA MAESTRA	109
2.4.3.7 MÓDULO DE EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LAS CAPAS GRANULARES	113
2.4.3.7. RESPUESTAS DEL PAVIMENTO	115
2.4.3.8. PARÁMETROS DE ENTRADA: DESEMPEÑO A LA FATIGA	117
2.4.3.8.1 MÓDULO DE RESULTADOS: FATIGA	119
2.4.3.8.2 RESULTADOS: DEFORMACIÓN PERMANENTE	121
2.4.3.8.3 RESULTADOS: RESUMEN EN MICROSOFT EXCEL	122
CAPITULO III: GENERACION DE ESPECTROS DE CARGA Y FACTORES CAMION PARA EL SALVADOR.	127
3.1 GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA	128
3.1.1 PESOS MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EL SALVADOR	128
3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE UN ESPECTRO DE CARGA	131
3.1.3 ESPECTROS DE CARGA PARA EL SALVADOR	132
3.1.3.1 ESPECTROS NORMALIZADOS PARA LOS AÑOS 2012 Y 2013	134
3.1.4 AJUSTE DE ESPECTROS DE CARGA, PARA LA INTRODUCCIÓN AL IMT-PAVE 1.2	139
3.1.4.1 DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL DE DOS PARÁMETROS	140
3.1.4.2 ESPECTROS DE CARGA AJUSTADOS	141
3.1.5 RESULTADO DE AJUSTE DE ESPECTROS	143

3.2 PORCENTAJES DE DISTRIBUCIÓN VEHICULAR.....	145
3.3 DETERMINACION DE FACTORES CAMION PARA EL SALVADOR.....	147
CAPITULO IV: ANALISIS COMPARATIVO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE LAS ALTERNATIVAS IMT-PAVE Y CR-ME Y EL METODO AASHTO 93.	165
4.1- DISEÑO PROPUESTO POR METODO AASHTO 93.....	166
4.2 MODULOS ELASTICOS PARA DISEÑOS POR ALTERNATIVAS MECANICISTA-EMPIRICAS.....	167
4.2.1 MODULO DINAMICO PARA LA CARPETA ASFALTICA.....	167
4.2.2 MODULOS RESILIENTES PARA DISEÑO POR ALTERNATIVAS MECANICISTA-EMPIRICAS.....	168
4.2.2.1 FORMULAS PARA CORRELACION ENTRE CBR Y MR.....	168
4.3 DATOS DE TRANSITO PARA DISEÑO.....	169
4.4 EVALUACION DE DISEÑO POR ALTERNATIVA IMT-PAVE.	169
4.4.1 ENTRADA DE DATOS.....	169
4.4.1.1 TRANSITO.....	169
4.4.1.2 GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA DEBIDO AL TRÁNSITO.....	170
4.4.1.3 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.....	170
4.5 PROPUESTA DE DISEÑO POR ALTERNATIVA IMT-PAVE.....	171
4.5.1 ESPECTROS DE RESPUESTA.....	172
4.6 EVALUACION DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME.....	173
4.6.1 REVISIÓN SIN REALIZAR ANÁLISIS CLIMÁTICO.....	173
4.6.1.1 TIPO DE ANÁLISIS.....	174
4.6.1.2 ENTRADA DE DATOS:.....	174
4.6.1.3 RESULTADOS DE REVISION SIN CLIMA.....	180
4.6.2 PROPUESTA DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME, SIN ANALISIS CLIMATICO.....	181
4.6.3 PROPUESTAS DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME, REALIZANDO ANALISIS CLIMATICO.....	183
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	189
5.1 CONCLUSIONES:.....	190
5.2 RECOMENDACIONES.....	192
BIBLIOGRAFÍA.....	194
ANEXOS.....	195
ANEXO A: DATOS DE TEMPERATURA PARA UN AÑO, ESTACION NUEVA CONCEPCION.....	195
ANEXO B: ENSAYOS DE TENSION INDIRECTA.....	198
ANEXO C: ANALISIS EN 3DMOVE.....	202
ANEXO D: DATOS DE SALIDA, 3D-MOVE.....	210

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: MÓDULOS DE POISSON CONVENCIONALES PARA MATERIALES DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.	26
TABLA 2.2: PERÍODOS DE DISEÑO SEGÚN EL TIPO DE CARRETERA.....	33
TABLA 2.3: LÍMITE DE PESO POR EJE	37
TABLA 2.4: FACTORES DE CRECIMIENTO DE TRÁNSITO	37
TABLA 2.5: HOJA PARA CALCULAR EL EQUIVALENTE DE 18 KIPS EN CARGA DE EJES SIMPLES.....	38
TABLA 2.6:FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR DIRECCIÓN	40
TABLA 2.7:FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL.....	41
TABLA 2.8:NIVELES DE CONFIABILIDAD	42
TABLA 2.9:TIEMPOS DE DRENAJE PARA CAPAS GRANULARES.....	52
TABLA 2.10:COEFICIENTES DE DRENAJE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (M_x)	53
TABLA 2.11:CANTIDAD DE AGUA QUE PUEDE DRENAR POR GRAVEDAD	56
TABLA 2.12:ESPEORES MÍNIMOS SUGERIDOS SEGÚN EL TRANSITO.....	65
TABLA 2.13:FACTORES DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL SEGÚN GUÍA AASHTO 93.	73
TABLA 2.14:VALORES TÍPICOS DEL MÓDULO DE RESILIENCIA, MR, PARA SUELOS CLASIFICADOS CON EL SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS, S.U.C.S.....	80
TABLA 2.15:PARAMETROS PARA SUELOS SEGÚN AASHTO Y ASTM.....	81
TABLA 2.15 A:VALORES RECOMENDADOS PARA DIFERENTES PRUEBAS, CON MATERIALES DE BASES Y SUBBASES.	81
TABLA 2.16:VALORES RECOMENDADOS POR EL INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.	82
TABLA 2.17:VALORES TÍPICOS DE MÓDULOS DINÁMICOS, A 20° C.....	82
TABLA 2.18:VALORES MÍNIMOS RECOMENDADOS, PARA ESPEORES EN FUNCIÓN DE ESAL'S.....	83
TABLA 2.19:GRADOS DEL ASFALTO DE ACUERDO AL TIPO DE CLIMA. EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN EL GRADO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.	83
TABLA 2.20:HUMEDADES DE MATERIALES FUENTE: (WITCZAK, ZAPATA, & HOUSTON).....	114
TABLA 2.21:GRAVEDAD ESPECIFICA DE MATERIALES FUENTE: (WITCZAK, ZAPATA, & HOUSTON).....	115
TABLA 2.22:INDICES DE VACÍOS DE MATERIALES FUENTE: (WITCZAK, ZAPATA, & HOUSTON).....	115
TABLA 3.1: PESO MÁXIMO PERMISIBLE POR TIPO DE EJE.....	130
TABLA 3.2: DATOS PARA GENERACIÓN DE ESPECTRO DE CARGA PARA EJE SENCILLO.....	134
TABLA 3.3: DATOS PARA GENERACIÓN DE ESPECTRO DE CARGA PARA EJE SENCILLO DUAL.....	135
TABLA 3.4: DATOS PARA GENERACIÓN DE ESPECTRO DE CARGA PARA EJE TÁNDEM	136
TABLA 3.5: DATOS PARA GENERACIÓN DE ESPECTRO DE CARGA PARA EJE TRÍDEM	138
TABLA 3.6: RESULTADO AJUSTE ESPECTRO SENCILLO	143

TABLA 3.7: RESULTADO AJUSTE ESPECTRO SENCILLO DUAL.....	143
TABLA 3.8: RESULTADO DE AJUSTE ESPECTRO TÁNDEM.....	144
TABLA 3.9: RESULTADO DE AJUSTE ESPECTRO TRÍDEM.....	144
TABLA 3.10: FACTORES DE CORRELACIÓN, ENTRE ESPECTROS NORMALIZADOS Y AJUSTADOS.....	144
TABLA 3.11. FACTOR CAMIÓN C-2	147
TABLA 3.12: FACTOR CAMIÓN C-2A.....	148
TABLA 3.13: FACTOR CAMIÓN C-3	150
TABLA 3.14: FACTOR CAMIÓN C-4	152
TABLA 3.15: FACTOR CAMIÓN T2-S2.....	152
TABLA 3.16: FACTOR CAMIÓN T3-S1.....	153
TABLA 3.17: FACTOR CAMIÓN T3-S2.....	156
TABLA 3.18: FACTOR CAMIÓN T3-S2-R4	157
TABLA 3.19: FACTOR CAMIÓN T3-S3.....	160
TABLA 3.20: FACTOR CAMIÓN T3-S3-R2	161
TABLA 3.21: FACTOR CAMIÓN T3-S3-R4	163
TABLA 3.22: RESUMEN DE FACTORES CAMIÓN.	164
TABLA 4.1: ESPESORES Y VALORES DE CBR, PARA DISEÑO.	166
TABLA 4.2: RESULTADOS DE ENSAYO DE LABORATORIO.	167
TABLA 4.3: ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	168
TABLA 4.4: DATOS DE TRÁFICO PESADO.	169
TABLA 4.5: RESULTADOS DE ITERACIONES EN IMT-PAVE.	171
TABLA 4.5: DATOS DE SALIDA, DEFORMACIONES EN 3DMOVE.....	177
TABLA 4.6: DATOS A INTRODUCIR EN EL MÓDULO RESPUESTAS DEL PAVIMENTO.	177
TABLA 4.7: CRITERIO DE DEFORMACIÓN DE LA FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION	180
TABLA 4.8: CRITERIO DE DEFORMACIÓN DE LA AASHTO	180
TABLA 4.9: PROPUESTAS DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME, SIN REALIZAR ANÁLISIS CLIMÁTICO	181
TABLA 4.10: PROPUESTAS DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME, (CON ANÁLISIS CLIMÁTICO).....	184

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1:GRÁFICA DE PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO.	17
FIGURA 2.2:ESTADO DE TRANSICIÓN DE METODOLOGÍAS EMPÍRICAS A MECANICISTAS.	18
FIGURA 2.3:INTERACCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL MODELO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO.	19
FIGURA 2.4:COMPONENTES CLAVES DE LAS METODOLOGÍAS MECANICISTAS.....	20
FIGURA 2.5:ESPECTRO DE CARGA PARA LOS EJES SENCILLO Y DUAL DE UNA CONFIGURACIÓN T3-S2	22
FIGURA 2.6:ESPECTROS DE CARGA, PARA EJES SENCILLO, DUAL, TÁNDEM Y TRÍDEM.....	23
FIGURA 2.7:MONTAJE DEL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO.	24
FIGURA 2.8:MONTAJE DEL ENSAYO DE MÓDULO DE RESILIENCIA	25
FIGURA 2.9:IMAGEN QUE MUESTRA EL AGRIETAMIENTO DE LA CAPA ASFÁLTICA.....	27
FIGURA 2.10:DEFORMACIÓN PERMANENTE DE CARPETA ASFÁLTICA	27
FIGURA 2.11:MECANISMOS DE ENSAYO PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	28
FIGURA 2.12: PUNTOS CRÍTICOS, PAVIMENTO DE ASFALTO CONVENCIONAL	29
FIGURA 2.13: PUNTOS CRÍTICOS, PAVIMENTO DE ASFALTO CON BASE ESTABILIZADA.....	29
FIGURA 2.14: PUNTOS CRÍTICOS, PAVIMENTO INTEGRAL DE ASFALTO.....	29
FIGURA 2.15: REPRESENTACIÓN DE 3 EJES CON SUS RESPECTIVAS CARGAS Y FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA (UTILIZANDO SN = 4, ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL = 2.5).....	39
FIGURA 2.16: ILUSTRACIÓN DEL FACTOR DE EQUIVALENCIA DE CARGA PARA EJES SIMPLE Y TÁNDEM.....	55
FIGURA 2.17:GEOMETRÍA DE UNA BASE PERMEABLE	55
FIGURA 2.18:ABACO PARA OBTENER LA PERMEABILIDAD K	57
FIGURA 2.19: COEFICIENTE ESTRUCTURAL A PARTIR DEL MÓDULO ELÁSTICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	578
FIGURA 2.20: VARIACIÓN EN EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE LA CAPA DE BASE	59
FIGURA 2.21:VARIACIÓN EN EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE LA CAPA DE BASE ESTABILIZADA	60
FIGURA 2.22:VARIACIÓN EN EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE LA CAPA DE SUBBASE	61
FIGURA 2.23: ÁBACO UTILIZADO PARA LA OBTENCIÓN DEL NUMERO ESTRUCTURAL (SN).....	63
FIGURA 2.24:REPRESENTACION DEL NUMERO ESTRUCTURAL (SN) Y ESPESORES (D) DE LA ESTRUCTURA ÉL UN PAVIMENTO.	65
FIGURA 2.25:EFECTO DEL DETERIORO DEL PAVIMENTO	69

FIGURA 2.26:INTERACCIÓN DE LAS DISTINTAS VARIABLES ASOCIADAS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS, Y SU DESEMPEÑO EN EL TIEMPO.	70
FIGURA 2.27:MENSAJE DE BIENVENIDA DE LA HERRAMIENTA IMT-PAVE 1.2.....	71
FIGURA 2.28: INTRODUCCIÓN DE DATOS DE TRÁNSITO.....	74
FIGURA 2.29:VENTANA PARA LA OPCIÓN DE PERSONALIZACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA.	75
FIGURA 2.30: GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA (SENCILLO, SENCILLO DUAL, TÁNDEM Y TRÍDEM) 76	
FIGURA 2.31: EJES SENCILLOS (UNA RUEDA POR EXTREMO).....	76
FIGURA2.32: EJES TÁNDEM (EJE SIMPLE CON DOS RUEDAS EN CADA EXTREMO)	77
FIGURA2.33: EJES TÁNDEM.....	77
FIGURA2.34: EJES TRÍDEM	77
FIGURA 2.35:INTRODUCCIÓN DE ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DEL PAVIMENTO.....	78
FIGURA 2.36: CORTE TRANSVERSAL TÍPICA DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	78
FIGURA 2.37: ESPECTROS DE DAÑO POR DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	86
FIGURA 2.38:ESPECTROS DE DAÑO POR FATIGA	86
FIGURA 2.39:PRUEBA DE CARGAS REPETITIVAS FUENTE. (HUANG, 2004)	91
FIGURA 2.40:DIAGRAMA DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA.....	92
FIGURA 2.41:PANTALLA INICIAL.....	93
FIGURA 2.42:PANTALLA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS GENERALES.....	94
FIGURA 2.43:PANTALLA DE ELECCIÓN DE TIPO DE ANÁLISIS	95
FIGURA 2.44:PANTALLA DE ELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE CAPAS.	97
FIGURA 2.45:PANTALLA DE ELECCIÓN DE ESPESORES PARA 3 CAPAS	98
FIGURA 2.46:PANTALLA DE ELECCIÓN DE ESPESORES PARA 4 CAPAS	99
FIGURA 2.47:PANTALLA PARA DETERMINAR ESPESORES SEGÚN AAHSTO 93	100
FIGURA 2.48:PANTALLA CUANDO NO SE TOMA EL CLIMA.	102
FIGURA 2.49:PANTALLA PARA INGRESO DE DATOS DEL CLIMA.....	102
FIGURA 2.50:PANTALLA DE PERFILES CLIMÁTICOS.	103
FIGURA 2.51:PANTALLA DE DATOS GENERALES DEL TRÁNSITO.	104
FIGURA 2.52:PANTALLA DE OPCIONES PARA LA INTRODUCCIÓN DE DATOS DE TRÁNSITO.....	105
FIGURA 2.53:PANTALLA PARA LA OPCIÓN DE INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DE TRÁNSITO.	106
FIGURA 2.54:PANTALLA PARA INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DE TRÁNSITO.	107
FIGURA 2.55:PANTALLA DE CUANDO NO SE TOMARAN EFECTOS TÉRMICOS.....	109

FIGURA 2.56:PANTALLA CUANDO SE TOMARAN EN CUENTA LOS EFECTOS TÉRMICOS.	110
FIGURA 2.57:PANTALLA DE INTRODUCCIÓN VALORES DE CARPETA.	111
FIGURA 2.58:CURVA MAESTRA.	112
FIGURA 2.59:PANTALLA CUANDO NO SE TOMA EN CUENTA LAS CAPAS GRANULARES.	113
FIGURA 2.60:PANTALLA CUANDO SE TOMARAN EN CUENTA LAS HUMEDADES DELAS CAPAS GRANULARES.....	114
FIGURA 2.61:PANTALLA DE ANÁLISIS DE RESPUESTA.	116
FIGURA 2.62:PANTALLA PARA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FATIGA.	117
FIGURA 2.63:PANTALLA DEL FACTOR C.....	118
FIGURA 2.64:PANTALLA DEL ANÁLISIS DE FATIGA.	119
FIGURA 2.65:PANTALLA DE RESULTADOS DE FATIGA.	120
FIGURA 2.66:PANTALLA DE RESULTADOS DE FATIGA.	121
FIGURA 2.67:PANTALLA DE INTERFAZ PARA GUARDAR.....	122
FIGURA 2.68:PANTALLA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN.	123
FIGURA 2.69:PANTALLA DE RESULTADOS DE LOS PERFILES CLIMÁTICOS.....	124
FIGURA 2.70:PANTALLA DE INTRODUCCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN.	125
FIGURA 2.71:PANTALLA DEL CÁLCULO DE LA SATURACIÓN.	126
FIGURA 3.1: PESOS MÁXIMOS REGULADOS PARA EL SALVADOR.....	129
FIGURA 3.2: IMPRESIÓN DE TICKETS DE PESAJE.	130
FIGURA 3.3: ESPECTROS DE CARGA AÑO 2012.	132
FIGURA 3.4: ESPECTROS DE CARGA AÑO 2013.	132
FIGURA 3.5: ESPECTROS DE CARGA PARA LOS AÑOS 2012 Y 2013.....	133
FIGURA 3.6: ESPECTRO DE CARGA PARA EJE SENCILLO.	134
FIGURA 3.7: ESPECTRO DE CARGA, EJE SENCILLO DUAL.	135
FIGURA 3.8: GRÁFICO ESPECTRO DE CARGA EJE TÁNDEM.	137
FIGURA 3.9: GRAFICO ESPECTRO DE CARGA EJE TRÍDEM.....	139
FIGURA 3.10: DISTRIBUCIÓN MULTIMODAL DE FRECUENCIA.	140
FIGURA 3.10 : ESPECTRO DE CARGA SENCILLO AJUSTADO.....	141
FIGURA 3.11: ESPECTRO DE CARGA SENCILLO DUAL AJUSTADO.....	142
FIGURA 3.12: ESPECTRO DE CARGA TÁNDEM AJUSTADO.....	142
FIGURA 3.13: ESPECTRO DE CARGA TRÍDEM, AJUSTADO.	143

FIGURA 3.14: DISTRIBUCIÓN VEHICULAR, AÑO 2012	145
FIGURA 3.15: DISTRIBUCIÓN VEHICULAR, AÑO 2013.	145
FIGURA 4.1: DISEÑO DE ESPESORES MÉTODO AASHTO 93.....	166
FIGURA 4.2: INTRODUCCIÓN DE TRÁNSITO AL IMT-PAVE 1.2	169
FIGURA 4.3: GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA IMT-PAVE 1.2.....	170
FIGURA 4.4: ANÁLISIS ESPECTRAL IMT-PAVE 1.2	170
FIGURA 4.6: ANÁLISIS ESPECTRAL, IMT-PAVE. (PROPUESTA)	171
FIGURA 4.7: ESPECTRO DE DAÑO POR DEFORMACIÓN PERMANENTE.	172
FIGURA 4.8: ESPECTRO DE DAÑO POR FATIGA.	172
FIGURA 4.9: DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE DAÑO POR DEFORMACIÓN PERMANENTE.	173
FIGURA 4.10: DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE DAÑO POR FATIGA.	173
FIGURA 4.11: ELECCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS, (REVISIÓN, NO REALIZAR ANÁLISIS CLIMÁTICO).....	174
FIGURA 4.12: ELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE CAPAS Y TIPO DE VÍA.	174
FIGURA 4.13: PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.	175
FIGURA 4.14: INTRODUCCIÓN DE PROPIEDADES DEL TRÁFICO.....	175
FIGURA 4.15: CONFIGURACIÓN DE EJES, CÁLCULO A PARTIR DE ENCUESTA DE CARGA.....	176
FIGURA 4.16: CÁLCULO DE ESAL'S A PARTIR DE ENCUESTA DE CARGA.	176
FIGURA 4.17: CONFIGURACIÓN DE EJES.	177
FIGURA 4.18: MÓDULO DE RESPUESTAS DEL PAVIMENTO.....	178
FIGURA 4.19: FACTOR C DE CORRECCIÓN PARA MEZCLA ASFÁLTICA.....	178
FIGURA 4.20: PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE FATIGA.	179
FIGURA 4.21: PARÁMETROS PARA LA EVALUACIÓN DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.	179
FIGURA 4.22: ANÁLISIS DE FATIGA.....	180
FIGURA 4.23: EVALUACIÓN DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.	181
FIGURA 4.24: ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PROPUESTA PARA ALTERNATIVA CR-ME (SIN ANÁLISIS CLIMÁTICO)	182
FIGURA 4.25: RESULTADOS DE FATIGA (PROPUESTA SIN CLIMA).....	182
FIGURA 4.26: RESULTADOS PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE (PROPUESTA SIN CLIMA)	183
FIGURA 4.27: ESTRUCTURA DE PAVIMENTO PROPUESTA (CON ANÁLISIS CLIMÁTICO)	185
FIGURA 4.28: INTRODUCCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS.....	186
FIGURA 4.29: INTRODUCCIÓN DE TEMPERATURA DIARIA ANUAL.	186

FIGURA 4.30: CREACIÓN DE PERFILES CLIMÁTICOS.	187
FIGURA 4.31: RESULTADO DEBIDO A FATIGA.	187
FIGURA 4.32: EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.	188

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso de pavimentos flexibles es muy común en nuestra región, como en todo el mundo, por lo que instituciones nacionales e internacionales, profundizan en la investigación, así como en la creación de nuevos métodos y alternativas de diseño, para crear estructuras de pavimentos, que sean cada vez más funcionales y económicas, en el presente estudio denominado *“Análisis comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante las alternativas: IMT-PAVE y CR-ME del método mecanicista empírico, con el método AASHTO 93”*, se estudiarán las alternativas y metodologías mencionadas.

El método AASHTO 93, es de carácter empírico, lo que hace que sea difícil establecer las relaciones propuestas para condiciones diferentes a las que existen en el lugar de prueba, situación que representa dificultades al momento de aplicarlo a condiciones locales de un proyecto, lo que hace necesario la combinación de conocimientos empíricos con conceptos mecanicistas, en la presente investigación se realizará un análisis comparativo entre las alternativas de diseño de pavimentos flexibles IMT-PAVE y CR-ME que son modelos mecanicistas-empíricos, calibrándolos a condiciones de nuestro país, de esta manera se tendrán nuevas alternativas de diseño de pavimentos flexibles, a manera de proporcionar un beneficio funcional y económico.

Este documento presenta el contenido de las diferentes etapas en las cuales se llevará a cabo el proceso de investigación, así como las respectivas evaluaciones durante la ejecución del proyecto. Se presenta la metodología que se utilizará para la investigación, la programación de las actividades, el presupuesto de los costos directos, así como los objetivos, y alcances en los que se pretende aterrizar con la investigación, además de la justificación del porque se debe llevar a cabo este proyecto.

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 DESARROLLO HISTÓRICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Los primeros métodos de diseño se remontan a tiempos antes de 1920. En ese tiempo los diseños se hacían en base a la experiencia y al sentido común del ingeniero, a veces los resultados eran buenos pero, cuando se extrapolaban a diferentes condiciones, es decir, zonas de diferente tipo de suelo, tráfico y clima, los resultados en estos casos se convierten en dudosos, por lo que los métodos eran poco confiables.

Estos métodos se clasifican en:

a) **Métodos basados en la mecánica de suelos.**

Estos se basan en principios geotécnicos, se busca proteger a la subrasante de tensiones excesivas, para ello se coloca un espesor suficiente de materiales por encima de la subrasante.

1. *Método del Índice de Grupo*

El concepto usado es que el Índice de Grupo de un suelo aumenta a medida que disminuye su calidad, por lo tanto, a subrasante de alto índice de grupo le corresponden grandes espesores de pavimentos y viceversa.

2. *Métodos Edafológicos*

Están basados en la clasificación de la formación de suelos. Se fundamentan en el principio de que los suelos de mismo origen y condiciones climáticas similares tienen las mismas propiedades ingenieriles.

b) **Métodos basados en la resistencia.**

Estos al igual que el anterior se basan en propiedades de los suelos que forman la subrasante, en este se usa la relación carga-deformación y resistencia de un suelo.

1. *Método del Valor de Soporte de California (CBR).*

Este usa las características de carga-deformación de la subrasante, subbase y base, y en forma empírica los relaciona con los espesores totales del pavimento. El CBR es la relación existente entre una carga que produce una deformación de 0.1 pulg (2.5mm) en el material en cuestión y la carga que produce esa misma deformación

en una muestra patrón que es un material granular de cualidades excelentes, este método ha tenido mucha relevancia en nuestro país, y se sigue usando.

2. *Método del valor R de soporte de Hveem*

Éste método se basa en el ensayo del estabilómetro de Hveem el cual mide las presiones desarrolladas en un material granular por efecto de la aplicación de una carga vertical.

3. *Métodos basados en ensayos de carga-deformación*

Supone que el comportamiento del pavimento es función de las características de carga-deformación de la subrasante, por lo que usualmente es utilizado el ensayo de placa de carga.

4. *Métodos basados en ensayos triaxiales.*

La muestra de material a ensayar es colocada dentro de una cámara triaxial, se le aplica una presión de confinamiento que simula las condiciones que actúan en el pavimento y se le carga verticalmente hasta la rotura. Estas tensiones de rotura se relacionan con los espesores de pavimentos necesarios para proteger la subrasante y también espesores de base para proteger la subbase.

1.2.2 METODOS DE DISEÑO BASADOS EN EXPERIMENTOS VIALES. (ROAD TEST)

Estos métodos provienen de la elaboración de tramos de prueba realizados en distintas partes de los Estados Unidos, de los cuales se estudian detenidamente para obtener conclusiones, que conlleven a la mejora en el diseño de pavimentos.

Entre estos experimentos viales están:

- 1- Experimento Vial de Batesa
- 2- Experimento Vial de Maryland
- 3- Experimento Vial de la WASHO
- 4- Experimento Vial de AASHO.

El experimento más completo fue el de la AASHO realizado hasta ese momento, sin embargo, contaba con ciertos defectos, los cuales consistían en un único ambiente, el

mismo tipo de subrasante y materiales para pavimentos del norte de Illinois. Como paso siguiente se consideran diferentes condiciones y materiales, los componentes del diseño que requerían verificación local son:

- Factor regional (clima)
- Valor de soporte para distintas subrasantes
- Coeficientes estructurales para distintas capas

A partir de esto se realizaron estudios complementarios en otras regiones de Estados Unidos con diferentes materiales y condiciones climáticas.

1.2.3 EVOLUCION DEL METODO AASHTO

- Entre los años 1958 a 1960 se realizaron los experimentos viales de la AASHO.
- En 1961 fue creada la primera Guía de Diseño AASHTO
- Entre 1961 y 1962 se realiza la Guía Provisional de AASHO
- En 1972 se revisó la Guía Provisional AASHO
- En 1986 apareció la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO
- En el año 1993 surgió la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO con el concepto del proceso de diseño de sobrecapas.
- En el año 1998 se presenta el suplemento para la guía presentada en el 1993 que estaba enfocada en el diseño de pavimentos rígidos. En esta etapa de la Guía de Diseño AASHTO se comenzó con los principios del método mecanicista.
- En el año 2002 se publica la Guía de Diseño Mecanicista Empírica, mejor conocida como Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), Guía Mecanicista-Empírica para Diseño de Pavimentos, por su traducción del inglés.

El dimensionamiento de la estructura de un pavimento flexible es un tema que ha ocupado a los ingenieros de carreteras desde el comienzo del siglo pasado; durante mucho tiempo, se han utilizado métodos que tienen gran correlación experimental y considerable tiempo de uso para su verificación, estos métodos suelen clasificarse en tres grupos:

- a) Métodos empíricos
- b) Métodos mecanicistas
- c) Métodos mecanicistas-empíricos

Métodos empíricos: estos métodos están basados en resultados de experiencias prácticas y ensayos de los cuales se deducen fórmulas, las cuales son calibradas posteriormente en base a la evaluación de resultados, requiere de muchas observaciones para establecer conexiones entre variables de diseño y su funcionamiento, además, no es necesario establecer bases científicas de conexiones observadas en los experimentos.

Métodos mecanicistas: su enfoque es puramente científico, permitiendo el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular, las propiedades elásticas de los materiales se deben conocer, así como las características geométricas, pudiendo también evaluar el deterioro con el paso del tiempo.

Métodos mecanicistas-empíricos: combina conocimientos mecanicistas para evaluar el comportamiento mecánico de un pavimento, es decir, se genera un modelo de carga, donde es posible conocer las respuestas críticas del pavimento, así como su deterioro.

Los componentes empíricos relacionan las respuestas del pavimento con su funcionamiento, algunos métodos de diseño mecanicista-empírico

- Método Shell (1977).
- Instituto del Asfalto (1982).
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 1992).
- Diseño Mecanicista-Empírico Surafricano (1992).
- Método de Diseño AASHTO-MEPDG

1.2.4 METODO AASHTO-MEPDG

La AASHTO-MEPDG (American Association of State Highway and Transportation Official Mechanistical Empirical Pavement Design Guide) fue desarrollada en base a la gran cantidad de

datos recolectados en Estados Unidos en el desarrollo del programa denominado “Long-Term Pavement Performance”, más conocido por sus siglas LTPP.

La guía de diseño AASHTO-MEPDG representa un cambio en la forma del desarrollo del diseño del pavimento. El diseñador considera en primer lugar condiciones de sitio como tráfico, clima, subrasante, condiciones del pavimento existente para el caso de rehabilitación y en segundo lugar una propuesta de un diseño de prueba que se ajusta al comportamiento estructural y funcional obtenido, el diseñador está envuelto en el proceso de diseño y tiene la facilidad de considerar características de diseño y materiales predominantes del sitio, de esta manera se tiene capacidad para medir el desempeño del pavimento a lo largo de su vida.

El formato empírico-mecanicista de AASHTO-MEPDG provee un bosquejo para el continuo mejoramiento y mantenimiento con cambios en el transporte, materiales, construcción, conceptos de diseño, uso de software, entre otros aspectos.

Esta guía de diseño considera tres elementos primordiales.

- 1- La teoría para predecir y generar las fallas asumidas o parámetros de deterioro.
- 2- La evaluación de las propiedades de los materiales aplicables a la teoría seleccionada.
- 3- La determinación entre la relación de la magnitud de los parámetros en cuestión al nivel de desarrollo deseado.

Ventajas y Características del diseño Mecanicista-Empírico.

- El diseño no se realiza solo para el espesor de la estructura.
- Aproximación comprensiva incluyendo consideraciones estructurales y de los materiales.
- Se tiene una guía mejorada para la rehabilitación de pavimentos.
- Manejo mejorado de efectos climáticos, así como diseños de seguridad.
- Introducción de nuevos Conceptos:
 - ✓ Funcionamiento basado en deterioros y calidad de la carretera.
 - ✓ Mejor caracterización de pavimentos existentes.

- ✓ Consideraciones directas de drenaje y erosión de la subbase.
- Adaptabilidad:
 - ✓ Mejor habilidad para manejar las características cambiantes del tránsito.
 - ✓ Capacidad para incorporar materiales pavimentados disponibles.
 - ✓ Capacidad de extrapolar de los estudios de campo y laboratorio.
- Considerando directamente indicadores críticos del funcionamiento del pavimento, la metodología del diseño mecanicista empírico trata de prevenir la ocurrencia de fallas prematuras del pavimento. Tal vez este es el beneficio más grande del método mecanicista-empírico.

A partir del año 1920 sectores del centro de San Salvador se pavimentaron con mezcla asfáltica y otros utilizando concreto hidráulico. Luego, entre 1921 y 1928 se dio un gran avance en la construcción de pavimentos, tanto del tipo mezcla asfáltica como de concreto hidráulico. En nuestro país y Centroamérica, para el diseño de espesores de pavimentos flexibles, usualmente se utiliza el método de la AASHTO, Asociación de Autoridades Estatales y Transporte por sus siglas en inglés, que utiliza el parámetro de serviciabilidad inicial y final en el diseño de pavimentos, se ha hecho uso de la fórmula empírica de la edición del año 1993.

1.2.5 ALTERNATIVAS DE DISEÑO BASADOS EN AASHTO-MEPDG

La nueva tendencia mundial es hacia lo mecánico-empírico, con la aparición en el 2002 del método AASHTO-MEPDG, el cual por falta de recursos tecnológicos no es aplicable directamente en muchos países como el nuestro, debido a ello se opta por desarrollar nuevas alternativas, basándose en los mismos principios, entre estos se encuentran el IMT-PAVE, sus siglas IMT por haber sido desarrollado por el Instituto Mexicano del Transporte, PAVE palabra en inglés que significa “pavimentar”. El cual es una herramienta informática para el diseño de pavimentos flexibles, que sin descuidar otros factores, pone un énfasis en el concepto de espectro de carga para relacionarlo con el de espectro de daño, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que presenta, esta es una herramienta informática libre, por lo que puede ser usada por distintos países, sin embargo es necesaria la calibración, ya que se ha creado en

base a datos de condiciones de México, esto se está llevando a cabo en países como Bolivia, Ecuador y Guatemala.

También tenemos el CR-ME (Costa Rica-Mecánico Empírico), el cual es una interfaz gráfica de cálculo asociada a la Guía Mecánica-Empírica de Diseño de Costa Rica, ésta es una herramienta en fase de desarrollo, la cual se está llevando a cabo por las siguientes instituciones de dicho país: La Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP), el Programa de Infraestructura y Transporte (PITRA); el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) y la Universidad de Costa Rica (UCR).

El PITRA (Programa de Infraestructura y Transporte) del Lanamme-UCR, es un programa que data de 1995, cuyo propósito es desarrollar y conservar la infraestructura de transporte de Costa Rica, realiza actividades de investigación, transferencia de tecnología y capacitación.

La UMP-PITRA, ha creado una serie de interfaces gráficas para diseño de pavimentos, con el objetivo de proveer a los ingenieros de pavimentos, alternativas que puedan representar de manera cercana las condiciones propias de la región, en cuanto a parámetros mecanicistas-empíricos.

Al igual que el IMT-PAVE, el CR-ME, es una herramienta informática libre, ya que están a cargo de instituciones gubernamentales, por lo que puede ser obtenida por los diseñadores de pavimentos, en sus sitios web oficiales.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Salvador, el desarrollo de la capacidad vial sigue en constante cambio, tanto en lo relativo a nuevas vías abiertas como a reconstrucciones y reparaciones, pudiéndose observar en la escena cotidiana trabajos en la infraestructura vial del país.

En lo relativo a los trabajos en la infraestructura vial, pese al auge observado en los últimos años, pocos cambios se hacen tangibles en los métodos de diseño utilizados, pues generalmente se concibe para el diseño de pavimentos flexibles, el uso del método de diseño AASHTO 93 (adaptado al Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos).

En general, la investigación en el área es poca, dándose lugar a un traslado constante de técnicas, metodologías y reglamentos ya existentes, desarrollados en países con avances más significativos en el área de carreteras, esto debido igualmente a una mayor inversión en la investigación científica de disciplinas con aplicación técnica en dichas naciones.

Dado que existen en el medio, otros enfoques de diseño de pavimentos, con bases mecanicistas-empíricas distintas, es de enorme conveniencia, de primera mano conocer dichas metodologías, en especial, debido a que en El Salvador no se está familiarizado con diversas opciones de diseño, con el objeto de comparar resultados en cuánto a las características de diseño que arrojaran cada una de ellas, analizando su desempeño, funcionalidad y las ventajas económicas de usar un método sobre otro.

Las necesidades actuales se van haciendo cada vez más grandes, exigiendo nuevos enfoques que permitan abordar el problema del diseño de pavimentos flexibles desde las perspectivas de la economía, la competencia estructural y funcional de la vía, requiriendo a su vez el estudio de nuevas metodologías de diseño que se adapten a los parámetros de entrada de nuestro país y que arrojen resultados adecuados en cuanto a los intereses proyectados.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un análisis comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante las alternativas IMT-PAVE, CR-ME y el método AASHTO 93.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1-** Comparar las variables de cada una de las alternativas y el método de diseño de pavimentos flexibles en estudio, así como sus fortalezas y debilidades, para diversos requerimientos en la estructura del pavimento flexible.

- 2-** Investigar y evaluar los parámetros de cada uno de las alternativas y método de diseño de pavimentos flexibles en estudio, comparando la facilidad o dificultad de obtención de los mismos en nuestro medio.

1.5 ALCANCES

La investigación del tema presente, tiene como alcance bien definido elaborar un análisis comparativo para diseño de pavimentos flexibles mediante las alternativas IMT-PAVE, CR-ME y el método AASHTO 93, evaluando los parámetros de diseño de cada uno de ellos y las variables generadas durante el proceso de diseño de un mismo pavimento flexible, generando un fundamento teórico y práctico, que permita al ingeniero civil optar por un método o alternativa de diseño en particular, apropiado a la necesidad que desea cubrir.

El presente estudió, busca también generar un primer acercamiento a las alternativas IMT-PAVE y CR-ME, ya que en nuestro país se usa desde hace muchos años para el diseño de pavimentos flexible el AASHTO 93, por lo cual es necesario abordar y desarrollar nuevas alternativas más en concordancia con las necesidades actuales de los pavimentos flexibles, sin embargo, no se espera introducir las alternativas al medio, pues se trata de un objetivo demasiado ambicioso y que demandaría una inversión de tiempo y recursos que exceden la capacidad de la presente investigación.

1.6 LIMITACIONES

- Con el presente estudio, no se espera introducir las alternativas al medio, pues se trata de un objetivo que demandaría una inversión de tiempo y recursos que exceden la capacidad de la presente investigación.
- También durante el análisis comparativo que se realizará a un diseño de pavimento flexible, nos limitaremos a realizar esta comparación con pavimentos flexible nuevos.
- Se realizara la comparación de los resultados que cada una de las alternativas; de lo cual se concluirá y se darán recomendaciones. Aquí nos limitaremos el mencionar que de las alternativas nos da resultados más confiables, en el caso que se analizará.
- Se tiene dificultad en la realización de ensayos de laboratorio, ya que no se cuenta con equipo de laboratorio especializado, debido a esto se utilizarán correlaciones con ensayos para los cuales no se cuente con el equipo necesario.

1.7 JUSTIFICACIÓN

Conociendo la alta inversión del estado en el área de infraestructura vial, se hace evidente la necesidad de brindar especial atención al rubro específico del diseño de pavimentos flexibles, con miras a hacer más efectivos los diseños logrando una economía sustancial y funcionamiento estructural en la ejecución de obras de gran envergadura, lo cual se puede traducir en millones de dólares que pueden alimentar proyectos de otras carteras estatales.

Es necesario conocer y aplicar varios métodos o alternativas de diseño a un pavimento flexible, generando diversos escenarios y configuraciones de los elementos diseñados, en base a teorías diversas y enfoques más apegados a las exigencias estructurales generadas por la demanda, sin dejar de lado el aspecto económico y tecnológico.

Es de considerar que en el país se usa para el diseño de pavimentos flexibles el Método AASHTO 93, cuando ya existen otros más actualizados y que evalúan de manera más detallada algunos aspectos que han evolucionado en los requerimientos de los pavimentos flexibles, especialmente las cargas de tránsito, efectos del clima y propiedades de los materiales. Dadas las condiciones existentes, donde es imperativa la necesidad de investigar y desarrollar nuevas alternativas existentes para el diseño de pavimentos flexibles, la realización de la presente investigación cobra sentido y trascendencia marcando una pauta hacia las nuevas tendencias que debe adoptar el diseño de pavimentos flexibles en miras de evolucionar a alternativas más actualizadas y con mejores posibilidades de evaluar las variables involucradas en el proceso mismo, buscando alcanzar mejores términos de desempeño y economía.

CAPITULO II:
CONCEPTOS
MECANICISTAS Y
DESCRIPCION DE LAS
ALTERNATIVAS IMT-PAVE,
CR-ME Y EL METODO
AASHTO 93.

2.1 CONCEPTOS MECANICISTAS EN PAVIMENTOS

Para comprender los Métodos mecanicistas para el análisis estructural y el diseño de pavimentos, es necesario conocer la esencia de dichos métodos, los cuales se ponen en énfasis en los conceptos involucrados, ya que en la definición de fórmulas matemáticas hay muchos coeficientes de ajuste los cuales no tienen un sentido físico, esto nos permite reflexionar sobre las limitaciones que se tienen en cuanto a llevar un modelo de campo a papel o en el mejor de los casos a un programa computacional.

Actualmente para el diseño de pavimentos el enfoque usado, son métodos empíricos, en los cuales el diseño de los espesores del pavimento es respaldado por propiedades físicas de los materiales y un índice de resistencia, que para nuestro país comúnmente es usado el valor de CBR por sus siglas en inglés California Bearing Ratio, el uso de módulo de Resiliencia el cual es un concepto mecanicista se ha encontrado por correlación con el valor de CBR, con los métodos empíricos como es el caso del método AASHTO 93, se tiene la incertidumbre de que las condiciones en las que se ha realizado el tramo de prueba, no son las mismas que las de nuestro país, debido a esto se necesita la introducción de grandes factores de seguridad, para poder brindar la confiabilidad necesaria. Ya que este enfoque está limitado por los tipos de suelos considerados los cuales cambian de sitio en sitio, los métodos de construcción los que cada vez son más modernos, las configuraciones vehiculares.

2.1.1 CONTENIDO DE LAS METODOLOGÍAS MECANICISTAS

Las metodologías mecanicistas buscan tener un enfoque puramente científico, con el fin de alcanzar un análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y el tránsito vehicular, conociendo las propiedades mecánicas de los materiales en campo o en laboratorio, para poder tener una correcta predicción del desempeño del pavimento, es decir la evolución que se tiene en el tiempo en cuanto a los deterioros que se prevén que se presentarán, por lo que se aumenta la confiabilidad de los diseños, en cuanto a metodologías empíricas.

2.1.2 VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO MECANICISTA-EMPÍRICO

- 1- El diseño ya no es solo para el espesor de la estructura.
- 2- Aproximación comprensiva incluyendo consideraciones estructurales y de los materiales.
- 3- Manejo mejorado de efectos climáticos y diseños de seguridad.
- 4- Nuevos Conceptos:
 - Funcionamiento basado en deterioros y calidad de la carretera.
 - Mejor caracterización de pavimentos existentes.
 - Consideraciones directas de drenaje y erosión de la subbase.
- 5- Adaptabilidad:
 - Mejor habilidad para manejar las características cambiantes del tránsito.
 - Capacidad para incorporar materiales pavimentados disponibles.
 - Capacidad de extrapolar de los estudios de campo y laboratorio.
- 6- A través de una consideración directa de indicadores críticos del funcionamiento pavimento, la metodología del diseño mecanicista, este tal vez sea el beneficio más grande de las metodologías mecanicistas, lo cual puede dicho de otra manera es el la predicción del desempeño, lo cual puede ilustrarse gráficamente en la figura 2.1

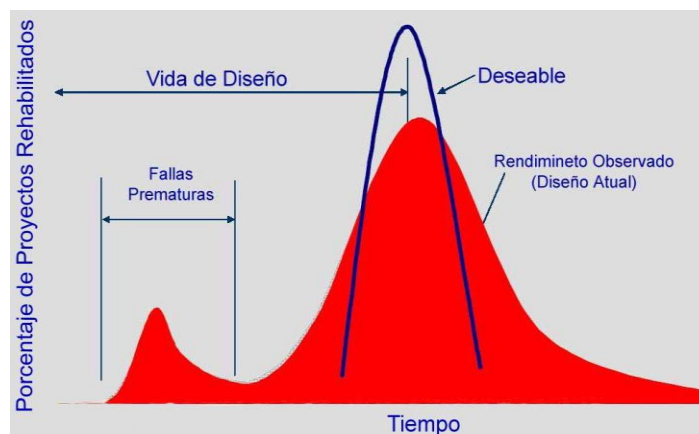


Figura 2.1: Gráfica de predicción de desempeño.

Fuente: Part 1- Introduction to 2002 Design Guide, Background.

2.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS METODOLOGÍAS MECANICISTAS

En cuanto a la práctica actual se está llevando a cabo con metodologías empíricas, pero la tendencia mundial es hacia metodologías empírico-mecanicistas, entre las cuales podemos mencionar el método de la AASHTO MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide), el método Shell, y el método norteamericano del Asfalto.

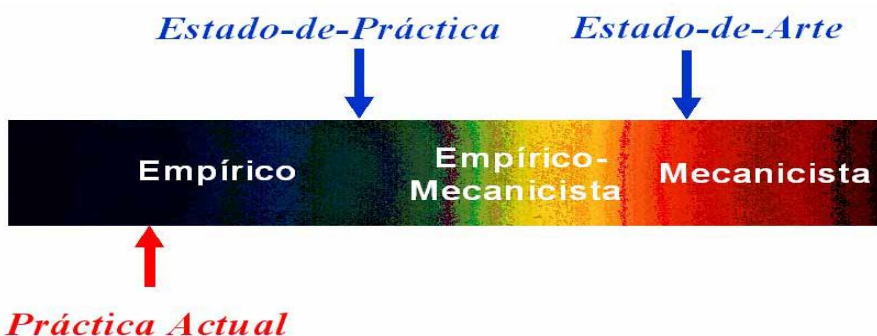


Figura 2.2: Estado de transición de metodologías empíricas a mecanicistas.

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

2.1.3.1 MODELO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

El adecuado modelo estructural para pavimentos tanto de estructuras flexibles como rígidas, es la clave de los métodos mecanicistas, la figura 2.3 muestra básicamente los datos de entrada al proceso de diseño, los cuales consisten en la estructura del pavimento, es decir la definición del número y espesor de las capas propuestas, el clima existente lo cual básicamente son datos de temperatura y precipitación, el tránsito, y las propiedades mecánicas de los materiales, los cuales son los módulos elásticos de cada una de las capas.

Los modelos de respuesta de la estructura son usados para calcular esfuerzos críticos (esfuerzos y deformaciones), lo cual cabe mencionar que son conceptos puramente mecanicistas, y dependen únicamente de las condiciones locales.

Estas respuestas son utilizadas en modelos de daños para acumular daños mes a mes a través del período de diseño. El daño acumulado en el tiempo es relativo para deterioros específicos tales como agrietamiento por fatiga, ahuellamiento el cual es entonces pronosticado usando campos calibrados de modelos de grietas (este es la parte principal del método empírico de un proceso de diseño mecanicista-empírico).



Figura 2.3: Interacción de los datos de entrada y salida del modelo estructural del pavimento.

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

2.1.3.2 ESTRUCTURAS Y COMPONENTES DEL DISEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO

El siguiente diagrama de flujo genérico (figura 2.4), representa un algoritmo que forma la base para la mayoría de diseños mecanicista, no hay arreglos de los componentes que existen en el proceso. Se enfatiza que la naturaleza iterativa del proceso de diseño es muy diferente de los procesos de diseño “paso a paso” basados en el cálculo de espesor de AASHTO.

También se hace énfasis que los criterios del funcionamiento, contra los cuales el diseño será verificado, se incorporarán al flujo grama como entradas de datos.

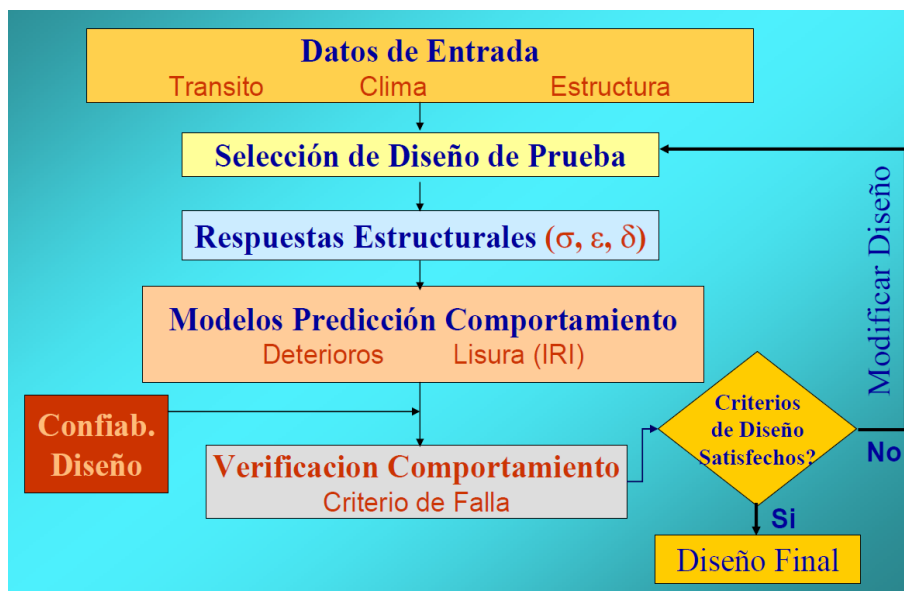


Figura 2.4: Componentes claves de las metodologías mecanicistas

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

2.1.3.2.1 COMPONENTES DE ENTRADA

La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores, es decir un diseño de prueba, para los parámetros de entrada, los cuales son enumerados a continuación.

- 1- Geometría de la estructura; los espesores de cada capa (base, sub-base, carpeta)
- 2- Propiedades mecánicas de los materiales: consisten en la introducción de módulos elásticos para cada una de esas capas, que serán módulos dinámicos o resilientes.
- 3- Tipo de clima del medio físico: definido por precipitación y temperatura, en el medio que atravesará la carretera.
- 4- Nivel de tránsito vehicular: definido ya sea en ejes equivalentes, o preferentemente a través de su correspondiente espectro de distribución de cargas.

2.1.3.2.2 CÁLCULO DE RESPUESTAS ESTRUCTURALES

Definido inicialmente el diseño inicial se procede al cálculo de lo que será, las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Lo cual consiste en conocer la

distribución de esfuerzos (σ), deformaciones unitarias (ϵ), y deflexiones (δ). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas en donde el comportamiento de los materiales se basa en la teoría de la elasticidad. Para esto se cuenta con programas diseñados para dicho fin entre los que podemos mencionar, Elsyim 5 y 3DMove.

2.1.3.2.3 CÁLCULO DEL NIVEL DE DAÑO

Partiendo de la respuesta estructural del pavimento, se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño para los diferentes tipos de deterioros que se pudieran presentar; estos deterioros pueden ser:

- 1- agrietamientos por fatiga
- 2- agrietamientos térmicos
- 3- deformaciones permanentes
- 4- el nivel de regularidad medido a través del llamado Índice de Regularidad Internacional (IRI).

Una vez calculados los niveles de deterioro para el período de diseño se comparan con los valores máximos permitidos por el diseñador, los cuales dependen por supuesto del tipo de camino del que se trate. Para caminos de altas especificaciones como autopistas, la exigencia deberá ser mayor.

Se puede apreciar que el método es iterativo, por lo que consiste en la selección de un diseño de prueba, el cual sino cumple con las exigencias requeridas, se pedirá la evaluación de otro diseño de prueba.

El cálculo se puede realizar de modo determinista, suponiendo solamente un valor medio para todos los parámetros involucrados, o probabilista, agregando el valor de incertidumbre para cada variable, usando por ejemplo la desviación estándar.

2.1.4 FACTORES DE ENTRADA AL PROCESO DE DISEÑO MECANICISTA

2.1.4.1 TRÁNSITO VEHICULAR

Comúnmente para métodos empíricos se usa el concepto del número de ejes equivalentes o ESAL, los métodos mecanicistas consideran la circulación de camiones cargados en términos de ejes de espectro de carga. Se consideran espectros de carga para ejes simples, tándem, y trídem.

El enfoque de ESAL's ya no es más utilizado como un dato de entrada directa en el diseño. En algunos casos será pedido como un diseño preliminar o bien con propósito de una revisión. En algunos casos, los espectros de carga serán convertidos en ESAL's internamente dentro del software como manera de hacer uso de modelos matemáticos previos que no los han convertido a una base de espectros de carga. Lo que se propone es trabajar directamente con las configuraciones vehiculares y su correspondiente distribución de cargas por eje, a través del concepto de espectro de carga.

Para ello veamos un ejemplo de un espectro de carga, generado por un T3-S2.

Se presenta un espectro de carga para los ejes sencillo y dual presentes en la configuración denominada T3-S2 en cierta estación de aforo. El espectro de carga se calcula a partir del cociente entre el número de un tipo de eje para un cierto nivel de carga y el número total ejes.

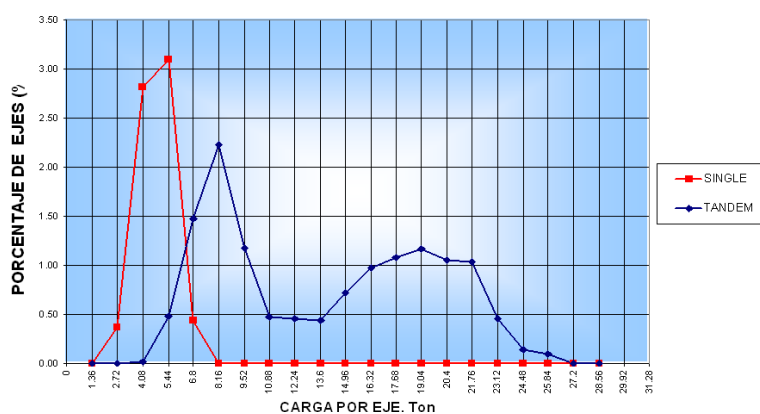


Figura 2.5-Espectro de carga para los ejes sencillo y dual de una configuración T3-S2

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

Interpretación de un espectro de carga.

Cada punto en el espectro de carga representa el porcentaje de ese tipo de eje que circula con cierto nivel de carga; los picos representan los mayores porcentajes de participación. En este caso el eje sencillo presenta un sólo pico, que significa que los ejes sencillos de un T3-S2 circulan con un valor promedio de carga del orden de las 5 t, lo que representa un 3% de participación con respecto a la totalidad de ejes en la estación de aforo. En la misma figura y para los ejes tándem, se pueden observar dos picos, que equivalen a dos situaciones diferentes, por ejemplo, a cuando circulan vacíos y/o cargados.

También es usual trazar los espectros de carga por tipo de eje, mezclando todas las clases de vehículos, a manera de tener una envolvente, ya que es el total de todos los espectros, teniendo así el total de ejes simples, tándem y trídem, para lo cual es necesario conocer las configuraciones de carga, que circula en la región.

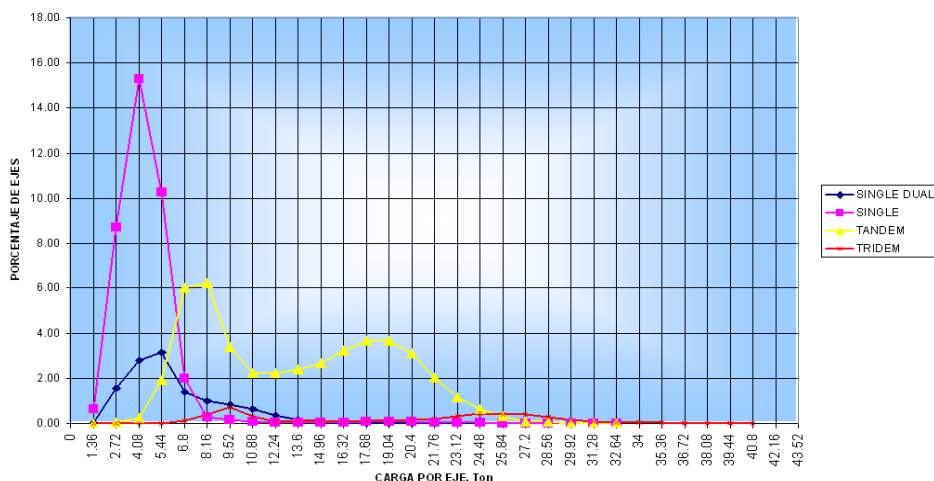


Figura 2.6: Espectros de carga, para ejes sencillo, dual, tándem y trídem

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

Para fines de diseño el número de ejes a considerar se deberá calcular para el carril de diseño, utilizando los factores pertinentes:

- 1-factor de distribución por carril
- 2- Factor de distribución por sentido de circulación.

Diseñando para el carril que se encuentre más cargado.

El complemento de la información referida al tránsito es:

- 1- Distancia entre ejes y llantas
- 2- Tasa anual de crecimiento
- 3- Presión de inflado de las llantas.

2.1.4.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Las propiedades fundamentales de los materiales que usualmente son parte de la sección estructural de un pavimento, se deben determinar a partir de ensayos de laboratorio de carga repetida.

1- Ensayo de modulo dinámico

Para el caso de las mezclas asfálticas, la propiedad se llama módulo dinámico, estandarizado según la norma ASTM D3497, en donde un espécimen cilíndrico se somete a pulsos repetidos de cierto esfuerzo cíclico, en condiciones de compresión no confinada. El módulo dinámico se calcula como el cociente entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga.



Figura 2.7: Montaje del ensayo de módulo dinámico.

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

2- Ensayo de Módulo de Resiliencia

Para suelos y materiales granulares (materiales de base, sub-base y subrasante), la propiedad de referencia es el módulo de resiliencia, que se ejecuta de acuerdo con la norma AASHTO T274. En este caso, la prueba se ejecuta por medio de un ensayo triaxial donde la presión de confinamiento es constante, y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. El módulo de resiliencia se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga. Los ensayos de módulo de resiliencia se deben realizar en condiciones representativas de la colocación de los materiales en obra, como son las características de peso volumétrico, contenido de agua de compactación, método de compactación, granulometría, etc., ya que el ensayo es muy sensible a esas condiciones.

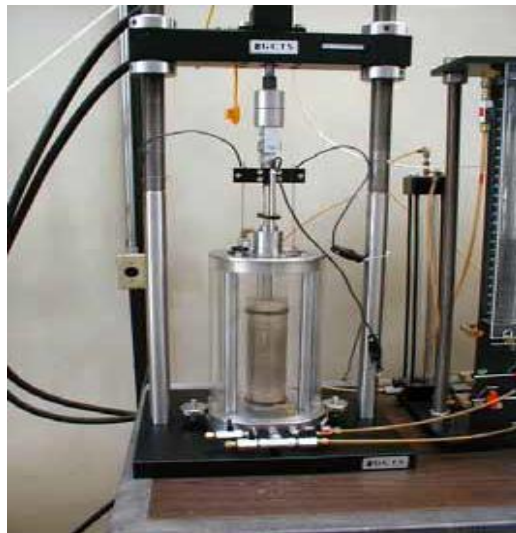


Figura 2.8: Montaje del ensayo de módulo de Resiliencia

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

En todos los materiales es necesario la obtención del módulo de Poisson, los cuales se pueden estimar a partir de la medición de otros parámetros más comunes como puede ser la resistencia a la compresión simple, o el valor de CBR, sin embargo siempre es mejor práctica la ejecución directa del ensayo, por lo general se usan estos valores de coeficientes de Poisson:

ELEMENTO	MÓDULO DE POISSON
Carpeta asfáltica	0.30
Base	0.35
Sub-base	0.35
Subrasante	0.40

Tabla 2.1: módulos de Poisson convencionales para materiales de pavimentos asfálticos.

Fuente: Evaluación del Espectro de Carga y coeficientes de daño del corredor de la Avenida Boyaca D.C, Bogota D.C, Juan Ricardo Troncoso Rivera.

2.1.4.3 FACTORES CLIMÁTICOS

Los factores climáticos son de mucha importancia, ya que pueden afectar directamente las propiedades de los materiales, siendo las variables del clima las más importantes la humedad y temperatura, presentes en la estructura del pavimento, la humedad es definida por el grado de precipitación presente en la zona, así también de manera secundaria afectan la distribución de todas las variables climáticas como: viento, radiación solar, humedad relativa, ciclos de hielo y deshielo (estos no los tenemos en zonas de clima tropical, sin embargo en zonas frías tiene gran influencia la disminución de la temperatura, ya que rigidiza en gran manera la carpeta asfáltica.)

2.1.5 ANÁLISIS MECANICISTA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

2.1.5.1 MODELOS DE DETERIORO

a) Agrietamiento

El agrietamiento puede tener distintos orígenes, el más considerado es el generado por la aplicación de cargas repetidas, que induce la fatiga del material de la carpeta asfáltica.

Tipos de carga repetida:

- inducida por el tráfico vehicular (Propagación ascendente)
- inducida por los ciclos de temperatura existentes (Propagación descendente).
- Las propiedades de fatiga de la mezcla asfáltica se determinan a partir de ensayos
- de flexión, o de tensión indirecta en mezclas asfálticas.



Figura 2.9: Imagen que muestra el agrietamiento de la capa asfáltica

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

b) deformación permanente

También están presentes en los pavimentos asfálticos los deterioros inducidos por las deformaciones permanentes, que se manifiestan en superficie a través de la formación de roderas, también se le llama ahuellamiento.



Figura 2.10: Deformación permanente de carpeta asfáltica

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

Las deformaciones permanentes se originan por la compresión y consolidación del material ante la acción de los esfuerzos normales y cortantes, transmitidos por el flujo vehicular. Por ello, los ensayos asociados involucran especímenes sometidos a condiciones triaxiales, o cortantes.

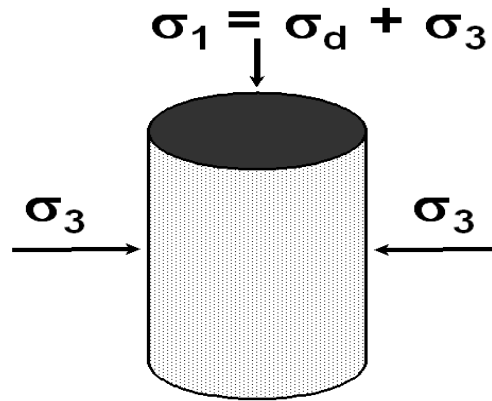


Figura 2.11: Mecanismos de ensayo para deformación permanente.

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

La deformación permanente que observamos en la superficie de rodamiento, es la suma acumulada de la contribución de todas las capas de la sección estructural en un pavimento. Más aún, es práctica común para fines de diseño, que la componente principal se debe al terreno de cimentación, y que la que resulta de las otras capas se puede controlar con una buena selección de materiales y excelentes prácticas constructivas.

Respuestas estructurales (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) en la sección estructural de un pavimento flexible, se considera una serie de puntos críticos a fin de calcular los valores más desfavorables. La práctica más común consiste en fijar un punto para estimar el agrietamiento por fatiga de la mezcla asfáltica en el contacto con la capa de base, y otro punto crítico para el cálculo de deformaciones permanentes situado en la parte superior de las terracerías o terreno de cimentación.

El cálculo se realiza a través de la teoría de Burmister para medios elásticos estratificados, en donde el material se caracteriza por su módulo de elasticidad y por la relación de Poisson. Para la mezcla asfáltica, el módulo que se debe emplear es el dinámico, y para suelos y materiales granulares, el módulo resiliente.

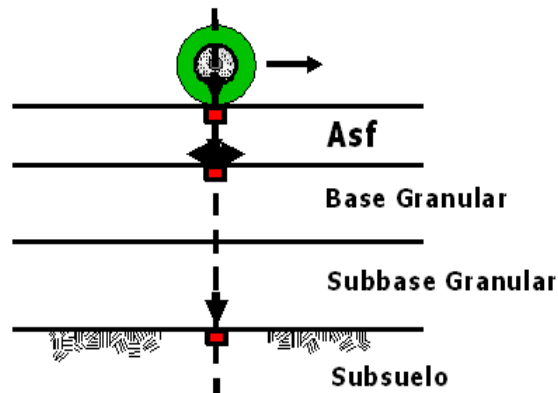


Figura 2.12: puntos críticos, pavimento de asfalto convencional

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

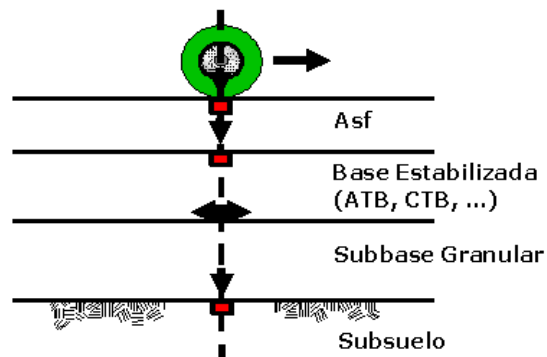


Figura 2.13: puntos críticos, pavimento de asfalto con base estabilizada.

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

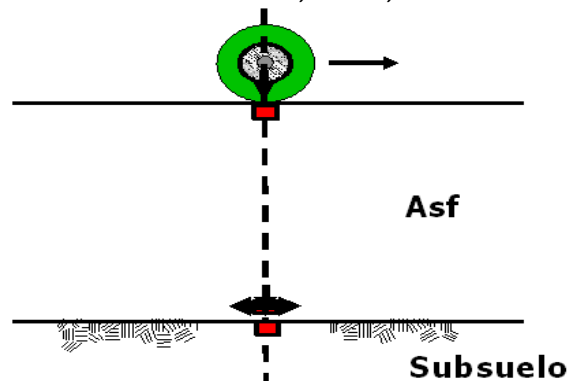


Figura 2.14: Puntos críticos, pavimento integral de asfalto

Fuente: Conceptos Mecanicistas de Pavimentos, PT258, Paul Garnica Anguas, Angel Correa

2.1.5.2 MODELOS DE REGULARIDAD SUPERFICIAL

Una buena manera de representar de forma cuantitativa el deterioro en cuanto a su regularidad superficial se hace con el uso del Índice de regularidad Internacional (IRI), así también el IRI inicial es un factor esencial, ya que un mejor valor de IRI, garantiza un mejor desempeño del pavimento, para establecer el modelo de regularidad se considera el cambio del IRI en el tiempo, una parte del cambio en el IRI se deberá a un deterioro superficial, otra parte por efecto de las bajas temperaturas o heladas, y otra parte por los cambios volumétricos del terreno de cimentación por efecto de la humedad.

2.2 MÉTODO AASHTO 93

2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Los primeros métodos de diseño se remontan a tiempos antes de 1920. En ese tiempo los diseños se hacían en base a la experiencia y al sentido común del ingeniero, a veces los resultados eran buenos pero, cuando se extrapolaban a diferentes condiciones, es decir, zonas de diferente tipo de suelo, tráfico y clima, los resultados en estos casos se convierten en dudosos, por lo que los métodos eran poco confiables.

Los métodos de diseño de la Asociación de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte por sus siglas en inglés (AASHTO) se basaron en prácticas, investigaciones, resultados y conclusiones obtenidos de ensayos de los experimentos viales de la Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras (AASHO) en Estados Unidos de América. AASHTO se volvió el punto de partida, para la práctica del diseño de pavimentos, con el surgimiento de ecuaciones empíricas que sirvieron de base para el diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos.

A través de los años, al cambiar los vehículos, aumentar las velocidades de operación y el aumento de la carga vehicular; surgieron como una preocupación y se volvió evidente la necesidad de un organizado y riguroso enfoque del diseño. El 1914, la AASHO, como se conoció

AASHTO hasta 1973, se creó como una organización de profesionales viales estatales para tratar las prácticas. Desde entonces, sirvió como un patrocinador o administrador de la evolución del diseño vial. Esta práctica de diseño se desarrolló durante los pasados 90 años en respuesta a los cambios tecnológicos, el crecimiento de la nación y cambios económicos y de política social. Los ensayos más relevantes de los experimentos viales AASHO fueron los realizados entre 1958 y 1960 cerca de Ottawa, en el Estado de Illinois.

Los primeros resultados fueron registrados entre los años de 1958 y 1960, así la primera guía de diseño AASHTO fue creada en 1962 y se conoció como Interim Guide for Design of Pavement Structures (Guía provisional para el Diseño de Estructuras de Pavimentos), la misma que ha sido evaluada y revisada en los años de 1972 y 1981. En el año de 1984, un subcomité de diseño y también consultores la terminaron de revisar publicándola en 1986, con varias modificaciones, con el nombre de AASHTO (Guía AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos). En 1993 esta se vuelve a revisar pero sin cambios en lo que a diseño de pavimentos de concreto y en 1998, con el suplemento de diseño AASHTO 1998, con esta se intenta incorporar conceptos mecanicistas a la guía.

Este método de diseño introdujo el concepto de falla funcional de un pavimento, en oposición a los métodos tradicionales hasta la fecha, los cuales se fundamentaban exclusivamente en los conceptos de falla estructural. Para cuantificar esta descripción funcional se utilizaron varios conceptos fundamentales, el primero se refiere a la "Serviciabilidad", es decir a la habilidad que tiene un pavimento para ser útil al tráfico para el cual fue diseñado. El otro concepto es el "comportamiento" del pavimento, que puede ser definido como su habilidad para servir al tráfico a lo largo del tiempo.

El método AASHTO 93 supone que un pavimento recién construido comienza a dar un servicio de alto nivel. A medida que el tiempo transcurre, y con él las repeticiones de carga de tránsito, el nivel de servicio baja. El método impone un nivel de servicio final que se debe alcanzar al concluir el periodo de diseño. Este método mantiene las ecuaciones de comportamiento de los pavimentos que se establecieron en el Experimento Vial de la AASHO (1961), como los modelos

básicos que deben ser empleados en el diseño de pavimentos; introduciendo sin embargo, los cambios más importantes sucedidos en diferentes áreas del diseño, incluyendo las siguientes:

1. Incorporación del "Factor de Confiabilidad" fundamentado en el posible cambio del tráfico a lo largo del período de diseño, lo cual permite al Ingeniero Proyectista utilizar el concepto de análisis de riesgo para los diversos tipos de facilidades viales a proyectar.

2. Se sustituye la Relación de Soporte (CBR) por el Módulo Resiliente (Método de Ensayo AASHTO T-274), con el cual se proporciona un procedimiento de laboratorio racional, o mejor aún de carácter científico que corresponde con los principios fundamentales de la teoría elástica para la determinación de las propiedades de resistencia de los materiales.

3. Utilización de los módulos resilientes para la determinación de los coeficientes estructurales, tanto de los materiales naturales o procesados, como de los estabilizados.

4. Se estableció guías para la construcción de sistemas de sub-drenajes, y modificación de las ecuaciones de diseño, que permitió tomar en cuenta las ventajas que resultan, sobre el comportamiento de los pavimentos, como consecuencia de un buen drenaje.

5. La sustitución del "Factor Regional", valor indudablemente bastante subjetivo; por un enfoque más racional que se toma en consideración a los efectos de las características ambientales como la humedad y la temperatura sobre las propiedades de los materiales.

$$\text{Log}_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \text{Log}_{10} (\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4.2 - 1.5} \right]}{\frac{0.40 + 1094}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \text{Log}_{10} M_r - 8.07$$

Ecuación 2.1: fórmula empírica Guía de Diseño AASHTO 93

Dónde:

W18 = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80kN) calculadas conforme al tránsito vehicular.

Z_r = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.

S_o = Desviación estándar de todas las variables.

ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.

M_r = Módulo de resiliencia de la subrasante.

SN = Número Estructural.

2.2.2 VARIABLES DE DISEÑO

2.2.2.1 VARIABLES EN FUNCIÓN AL TIEMPO

El Período de diseño es el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del pavimento se comiencen a alterar desproporcionadamente.

La vida útil de un pavimento, es aquel tiempo que transcurre entre la construcción de este y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad. El período de diseño comprende varios períodos de vida útil que son: *El de pavimento original y el de las rehabilitaciones.*

TIPO DE CARRETERA	PERÍODO DE DISEÑO
Autopista regional	20 - 40 años
Troncales suburbanas	15 - 30 años
Troncales rurales	
Colectoras Suburbanas	10 - 20 años
Colectoras Rurales	

Tabla 2.2: Períodos de diseño según el tipo de carretera

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2,001

2.2.2.2 VARIABLES EN FUNCIÓN DEL TRÁNSITO

Para el diseño de estructuras de pavimento es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para el efecto se realizan estudios de volúmenes de tránsito, los cuales pueden variar desde los más amplios en un sistema de caminos, hasta el recuento en lugares específicos tales como: Puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

El objetivo por el cual se realizan estos conteos es:

- *Para la determinación de los tipos y la cantidad de vehículos que transitan en un sistema de carreteras.*
- *Para determinar el número de vehículos que circulan en cierta zona o que circulan dentro de ella.*
- *La evaluación de los índices de accidentes.*
- *Para servir de base para la clasificación de caminos.*
- *Para obtener datos que serán útiles para la planeación de rutas y la determinación de proyectos geométricos.*
- *Para proyectar sistemas de control de tránsito.*
- *Realizar sistemas de mantenimiento.*
- *Establecer prioridades y técnicas de construcción.*
- *Realizar proyecciones de tránsito futuro, etc.*

En todo estudio de volúmenes de tránsito es necesario obtener dos datos básicos: el tránsito medio diario general y el tránsito medio diario de camiones. Estos se pueden obtener al efectuar censos o aforos de tránsito en el lugar de la construcción o si es nueva, mediante censos o aforos de tránsito en lugares próximos.

Es necesario que al efectuar la evaluación de tránsito para una carretera determinada, se tome en cuenta la localización geográfica dentro del complejo de la red vial y áreas que la circundan, con el objeto de tomar en cuenta hasta donde sea posible los futuros desarrollos de complejos habitacionales, industriales, turísticos, agrícolas y proyectos de carácter regional, que

contribuirán más adelante con el tiempo a incrementar el flujo vehicular de la carretera proyectada.

El tránsito es diferente según el día de la semana, es diferente según la semana del mes, es diferente según la estación o época del año, es diferente según los días de descanso o asueto, etc. Por lo que es necesario hasta donde sea posible, contar con estadísticas de largos períodos de evaluación del tránsito, para analizar el comportamiento de los diferentes volúmenes y tipos de vehículos, que nos permitan de una mejor forma la evaluación de las cargas que se aplicarán a la estructura de pavimento.

Otra de las consideraciones que es necesario conocer son las tasas de crecimiento o el incremento anual del tránsito, la distribución por dirección en cada sentido del camino y si fuera en carreteras con más de dos vías, la distribución vehicular en cada una de ellas.

2.2.2.2.1 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES

Este proceso de convertir un tránsito mixto en un número de ESAL's fue desarrollado por el Road Test de AASHO. Para este ensayo se cargaron pavimentos similares con diferentes configuraciones de ejes y cargas, para analizar el daño que produjeron. Un tránsito mixto está compuesto de vehículos de diferente peso y número de ejes y que para efectos de cálculo se les transforma en un número de ejes equivalentes de 80 kN o 18 kips, el cual se denomina "Equivalent Simple Axial Load" o ESAL's (ejes equivalentes) que producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de los vehículos.

El valor con el cual se valúan las condiciones de deterioro o confort de la superficie de rodadura de un pavimento es el Índice de Serviciabilidad; actualmente para realizar la medición de este deterioro se utiliza el IRI, Índice Internacional de Rugosidad (International Roughness Index), este mide los altibajos y los suma, por lo que al final se obtiene un valor acumulado en metros por kilómetro (m/km) o pulgada por milla (plg/milla). La correlación del Índice de Serviciabilidad y el IRI, se utiliza la siguiente ecuación:

$$PSI = 5xe^{(-0.0041xIRI)}$$

Ecuación 2.2: índice de Serviciabilidad Inicial

Dónde:

PSI = Índice de Serviciabilidad

IRI = Índice Internacional de Rugosidad

e = 2.71828183 (Número de Euler)

El Factor Equivalente de Carga (LEF), es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de Serviciabilidad (ΔPSI) causada por la carga de un tipo de eje de 80 kN y la pérdida de serviciabilidad producida por un eje estándar en el mismo eje.

$$LEF = \frac{\text{No.deESAL's de 80 kN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No.De ejes de 80 kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Ecuación 2.3: Factor Equivalente de Carga (LEF)

Debido a que cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEF también cambian en función del tipo de pavimento. Por lo que, los pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes LEF y que también cambia según el SN (número estructural) en pavimentos flexibles, además que también cambia según el valor del índice de serviciabilidad asumido para el diseño.

2.2.2.2 DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO

Para realizar la determinación y cálculo de los ejes equivalentes se requiere el uso de factores camión para cada clase particular de vehículo, principalmente para camiones pesados. Esto debe hacerse usando los pesos límites de cada vehículo.

Tipo de Vehículo	Tipo de eje del tractor				Tipo de eje del semiremolque			Total Toneladas
	Eje simple direccional	Eje de tracción			Eje de arrastre			
		Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	
C2	5.00	10.00					15.00	
C3	5.00		16.50				21.50	
C4	5.00			20.00			25.00	
T2-S1	5.00	9.00			9.00		23.00	
T2-S2	5.00	9.00				16.00	30.00	
T2-S3	5.00	9.00				20.00	34.00	
T3-S1	5.00		16.00		9.00		30.00	
T3-S2	5.00		16.00			16.00	37.00	
T3-S3	5.00		16.00			20.00	41.00	
Otros	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Variable	

Tabla 2.3: Límite de peso por eje

Fuente: Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, SIECA, 2000. Resolución 02-01 COMITRAN XXIII.

También se presentan los porcentajes de tasa anual de crecimiento vehicular, que se usará y el período de diseño de la estructura de pavimento, lo que nos da el factor de crecimiento de tránsito. Hay que tener presente que el porcentaje de la tasa anual de crecimiento de vehículos, se puede cambiar utilizando diferentes porcentajes, dependiendo del tipo de vehículo que se considere que va a aumentar o disminuir más que los otros.

Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)							
		2	4	5	6	7	8	10	
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10	
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31	
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64	
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11	
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72	
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49	
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44	
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58	
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94	
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53	
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38	
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52	
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97	
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77	
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95	
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55	
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60	
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16	
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28	
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35	
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49	
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02	

Tabla 2.4: Factores de crecimiento de tránsito

Fuente: Tabla D-20 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993

Para el cálculo de los ESAL's de diseño, se necesita conocer el periodo de diseño, el SN e índice de serviciabilidad final. Se procede a llenar la hoja siguiente:

Tipo de Vehículo	Cantidad de Vehículos diarios	Factor de crecimiento	Tránsito de diseño	ESAL's Factor	ESAL's de diseño
Vehículos sencillos Autos Autobuses					
Pick-ups Otros Vehículos 2 ejes y cuatro ruedas (agrícolas) Camiones de 2 ejes, 6 ruedas, camiones de 3 ejes o más					
Camiones tipo trailer eje compuesto Semirremolque (3 ejes) Semirremolque (4 ejes) Semirremolque (5 o más ejes)					
Camión acoplado (5 ejes) Camión acoplado (6 o más ejes)					
TOTAL VEHICULOS			ESAL's de diseño		

*Tabla 2.5: Hoja para Calcular el equivalente de 18 Kips en carga de ejes simples
Fuente: Tabla D-19 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993*

Pasos para el cálculo de los ESAL's de diseño:

1. En la columna de **Cantidad de Vehículos diarios** se pondrá la cantidad diaria de cada tipo de vehículo especificado y del cual se tenga el conteo correspondiente.
2. En la columna de **Factor de crecimiento** se colocará el correspondiente factor de crecimiento para cada tipo de vehículo, el cual depende de la tasa de crecimiento asumida para cada tipo de vehículo y el período de diseño considerado, cada tipo de vehículo puede tener una tasa de crecimiento distinta, ya que no todos los tipos de vehículos tienen que crecer a la misma tasa.
3. En la columna **Tránsito de diseño** se coloca el producto de las columnas de Cantidad de Vehículos diarios y Factor de crecimiento multiplicado por 365 (días del año).

4- En la columna **ESAL's Factor** se coloca el factor de ESAL's, que depende de cada peso y configuración o tipo de camión (ejes simples, tándem o trídem) y los valores asumidos de índice de serviciabilidad final y el número estructural (SN para pavimentos flexibles).

5- En la columna **ESAL's de diseño** se coloca el producto de las columnas de Tránsito de diseño y ESAL's Factor.

La suma de la columna **ESAL's de diseño** es el número total de ESAL's para el diseño del pavimento considerado y el cual debe afectarse por el factor de distribución por dirección y el factor de distribución por carril, utilizando la ecuación siguiente:

$$\text{ESAL's por carril de tránsito} = \text{LD} \times \text{LC} \times \text{ESAL's de diseño}$$

(Ecuación 2.4)

Dónde:

Factor de Dirección = LD

Factor de Carril = LC

Factores de equivalencia de la carga

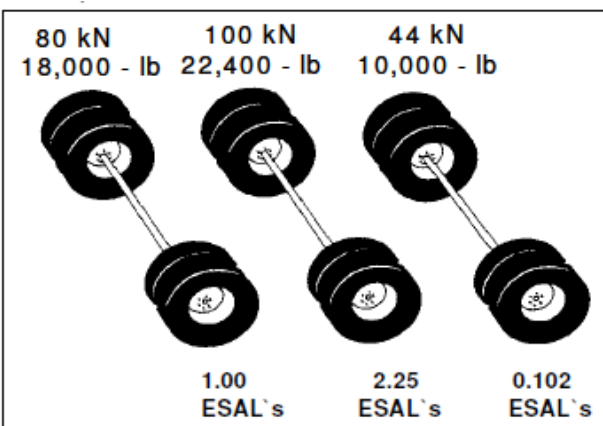


Figura 2.15: Representación de 3 ejes con sus respectivas cargas y factor de equivalencia de carga (utilizando SN = 4, Índice de Serviciabilidad final = 2.5)

Fuente: Hoja de trabajo HT - 01 del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos

Factor Camión: Se puede definir simplemente como “el número de ESAL’s por vehículo”, por lo que corresponde a la suma de ESAL’s por cada eje en particular, como se puede observar para los vehículos en la figura.

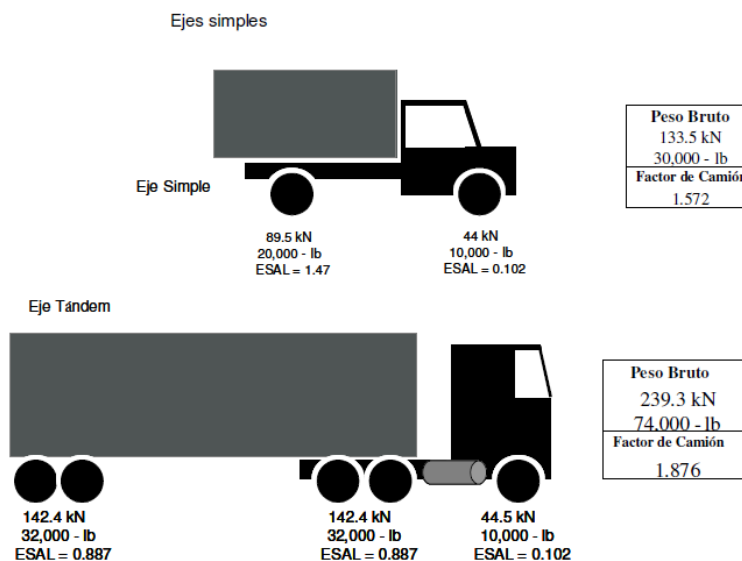


Figura 2.16: Ilustración del factor de equivalencia de carga para ejes simple y tándem
Fuente: Hoja de trabajo HT - 01 del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos

2.2.2.2.3 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR DIRECCIÓN

Es el factor del total del flujo vehicular contados, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección. Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo cual puede deducirse del conteo de tránsito efectuado. Lo más importante de esto, será la diferencia de peso entre los vehículos que van en una y en otra dirección; como puede suceder por la cercanía de una fábrica, puerto, etc.

Número de carriles en ambas direcciones	LD
2	50
4	45
6 o mas	40

Tabla 2.6: Factor de distribución por dirección

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

2.2.2.2.4 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL

Este se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para un camino de dos carriles, cualquiera de las dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril. Para caminos de varios carriles, el de diseño será el externo, por el hecho de que los vehículos pesados van en ese carril.

Número de carriles en una sola dirección	LC
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Tabla 2.7: Factor de distribución por carril

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

2.2.2.3 CONFIABILIDAD (R)

La confiabilidad (R) ha sido incorporada con el propósito de cuantificar la variabilidad propia de los materiales, procesos constructivos y de supervisión que hacen que los pavimentos construidos de la “misma forma “presenten comportamientos de deterioro diferentes.

La confiabilidad se refiere al grado de certidumbre (seguridad) de que una determinada alternativa de diseño alcance a durar y es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente durante su vida útil o período de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medioambiente dentro de dicho período. En cierta manera la confiabilidad es un factor de seguridad, que equivale a incrementar en una proporción el tránsito previsto a lo largo del periodo de diseño, siguiendo este un concepto estadístico que considera una distribución normal de las variables involucradas.

Niveles Recomendados de Confiabilidad (R)		
Clasificación de la vía	Urbana	Rural
Autopistas	85-99,9	80-99,9
Troncales	80-99	75-95
Locales	80-95	75-95
Ramales y Vías Agrícolas	50-80	50-80

Tabla 2.8: Niveles recomendados de confiabilidad (R).

Fuente: Tabla 2.2 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993

El valor de la confiabilidad está relacionado al concepto de optimización del costo total del pavimento. Con valores de R cercanos a 50% se obtienen menores espesores de pavimento y por lo tanto los costos de construcción (al inicio) serán menores. Sin embargo, esto implica que el deterioro será mayor y los costos asociados al mantenimiento del pavimento a lo largo de su vida útil serán altos.

Con valores de R cercanos a 100% se obtienen mayores espesores de pavimento y por lo tanto los costos de construcción aumentan. Esta vez los costos de mantenimiento asociados a su vida útil serán mucho menores. El valor R que se debe colocar es aquel que obtiene el menor costo total u óptimo (suma de los costos de construcción y mantenimiento).

Para la confiabilidad "R" se recomiendan valores desde 50 y hasta 99.9, con diferentes clasificaciones funcionales, notándose que los niveles más altos corresponden a obras que estarán sujetas a un uso intensivo, mientras que los niveles más bajos corresponden a obras o caminos locales y secundarios.

2.2.2.3.1 CRITERIOS PARA DETERMINAR LA SERVICIABILIDAD.

La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, esta se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindarle al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la vía. También se relaciona con las características físicas

que puede presentar el pavimento como lo son grietas, fallas, etc., los cuales pueden afectar la capacidad de soporte de la estructura del pavimento (comportamiento estructural).

El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales las cuales son:

1. Las carreteras están construidas para el confort y conveniencia del público usuario.
2. El confort y calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
3. La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación realizada por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
4. Hay características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este proceso produce un índice de serviciabilidad objetivo.
5. El comportamiento se puede representar por la historia de la Serviciabilidad de un pavimento.

La serviciabilidad se caracteriza en una escala de 0 a 5; donde 0 significa una calificación de intransitable y 5 una calificación de excelente. AASHTO 93 emplea el valor de 1.5 como índice de serviciabilidad terminal del pavimento. La medida fundamental de la serviciabilidad, tal como fue establecida en el Experimento Vial de la AASHO.

El método AASHTO 93 caracteriza el servicio con dos parámetros: índice de servicio inicial (P_o) e índice de servicio final (P_f). En la ecuación de AASHTO 93 se ingresa la variación entre ambos índices (Δpsi) para el cálculo de espesores. Entre mayor deterioro soportará el pavimento antes de fallar.

El Índice de Serviciabilidad Inicial (P_o), se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación, este queda en función del diseño de pavimentos y del grado de calidad durante la construcción. El valor que se estableció en el Experimento Vial de la AASHO para los pavimentos flexibles fue de 4.2.

El Índice de Serviciabilidad Final (P_f), ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario, este es el valor más bajo que puede ser tolerado antes de que sea necesario tomar acciones de rehabilitación, reconstrucción o repavimentación, y generalmente estos valores varían con la importancia o clasificación funcional de la vía cuyo pavimento se diseña, y son normalmente los siguientes:

- Vías con características de autopistas urbanas y troncales de intensidad de tráfico alto: $p_t = 2.5 - 3.0$
- Vías con características de autopistas urbanas y troncales de intensidad de tráfico normal, así como para autopistas Interurbanas: $p_t = 2.0 - 2.5$
- Vías locales, ramales, secundarias y agrícolas se toma un valor de: $p_t = 1.8 - 2.0$

Los factores que más influyen en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son el tráfico, el medio ambiente y la edad del pavimento. Los efectos que causan éstos factores en el comportamiento del pavimento ya han sido considerados en este método.

2.2.2.4 DESVIACIÓN ESTÁNDAR (S_o)

Desviación estándar del sistema, es función de las posibles variaciones en las estimaciones de tránsito (cargas y volúmenes) y comportamiento del pavimento a lo largo de toda su vida de servicio. Este valor acota la variabilidad de todos estos factores dentro de unos límites permisibles, con el fin de asegurar que la estructura del pavimento se comporte adecuadamente durante todo su período de diseño.

Valores de desviación estándar, en los tramos de prueba de AASHTO, no incluyeron ningún error en la estimación del tránsito; sin embargo, el error en la predicción del comportamiento de las secciones en tales tramos, fue de 0.35 para los tramos de pavimentos flexibles, lo que corresponde a un valor de la desviación estándar total debidos al tránsito de 0.45 para pavimentos flexibles respectivamente. El valor de la desviación estándar que se seleccione debe ser representativo de las condiciones locales.

Este parámetro está ligado directamente con la Confiabilidad (R), habiéndolo determinado, deberá seleccionarse un valor S_o “Desviación Estándar Global”, representativo de condiciones locales particulares, que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito.

2.2.2.5 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

Se consideraron las propiedades de los materiales, que son las que se valoran para obtener el módulo de resiliencia, ya que en función de éste se llega a los coeficientes de los números estructurales (SN).

La subrasante es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como Módulo de Resiliencia (Mr).

Inicialmente cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimento, este concepto estaba basado en las propiedades de la subrasante tales como: la granulometría, plasticidad, clasificación de suelos, etc. Posteriormente se tomaron en cuenta las propiedades básicas de la subrasante y se analizaron otro tipo de ensayos que permitieran conocer en mejor forma el comportamiento de estos suelos. Se efectuaron ensayos utilizando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, ensayos de compresión simple. Estos se cambiaron por ensayos dinámicos y de repetición de cargas como el del módulo de resiliencia, que son pruebas que demuestran en mejor forma el comportamiento y lo que sucede debajo de los pavimentos en lo que respecta a tensiones y deformaciones.

La calidad de los suelos en el caso de las subrasantes, se puede relacionar con el módulo de resiliencia, módulo de Poisson, valor soporte del suelo (CBR).

2.2.2.5.1 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS SUELOS PARA SUBRASANTE

La subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura de un pavimento. Dichas propiedades de los suelos que constituyen la subrasante, son las variables más importantes que se deben considerar al momento de realizar un diseño. Las propiedades físicas se mantienen invariables aunque se sometan a tratamientos tales como homogenización, compactación, etc., Sin embargo, ambas propiedades cambiarían cuando se realicen en ellos procedimientos de estabilización, a través de procesos de mezclas con otro materiales (cemento, cal, puzolanas, etc.) o mezclas con químicos.

Para conocer las propiedades de los suelos en un proyecto, es necesario tomar muestras en todo el desarrollo del mismo (calicatas), posteriormente en el laboratorio se determinarán sus propiedades:

- Granulometría
- Límites de Atterberg (líquido e índice plástico)
- Valor Soporte (CBR)
- Densidad (Proctor)
- Humedad

Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es el indicador de las propiedades físico - mecánicas que tienen los suelos. La clasificación que mejor describe y determina las propiedades de un suelo a usarse como subrasante es la clasificación de AASHTO M-145; las primeras variables son: la granulometría y la plasticidad. En términos generales, un suelo conforme a su granulometría se clasifica así:

Grava: de un tamaño menor a 76.2 mm (3") hasta tamiz No. 10 (2 mm)

Arena Gruesa: de un tamaño menor a 2 mm hasta tamiz No.40 (0.425 mm)

Arena Fina: de un tamaño menor a 0.425 mm hasta tamiz No.200 (0.075 mm)

Limos y Arcillas: tamaños menores de 0.075 mm

Dos suelos considerados finos que tengan granulometrías similares, pueden llegar a tener propiedades diferentes dependiendo de su plasticidad, cualidad que se analiza en el suelo que

pasa el tamiz No. 40; dichas propiedades de plasticidad, se analizan conforme las pruebas de límites de Atterberg, las cuales son:

Límite Líquido o LL: Es el estado de un suelo, cuando pasa de un estado plástico a un estado semilíquido.

Límite Plástico o LP: Es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo.

Índice Plástico o IP: es la diferencia entre LL y LP, que nos indica la plasticidad del material. Se concluye que para los suelos gruesos, la propiedad más importante es la granulometría y para los suelos finos son los límites de Atterberg.

2.2.2.5.2 ENSAYOS DE SUELOS

Existen diferentes métodos para medir la resistencia de los suelos de la subrasante que han sido sometidos a cargas dinámicas de tránsito, entre los cuales están los siguientes:

- ✓ Relación de Valor Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio) Valor de resistencia Hveem (Valor R)
- ✓ Ensayo de plato de carga (Valor k)
- ✓ Penetración dinámica con cono
- ✓ Módulo de resiliencia (Mr) para pavimentos flexibles

Valor soporte California (CBR, AASHTO T-193)

Este ensayo fue inventado por la División de Carreteras de California en 1929 y nos permite determinar la Resistencia al Corte de un suelo bajo condiciones de Humedad y Densidad controladas.

En este ensayo, se mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 plg². De área en una muestra de suelo de 6 plg. (15 cm) de diámetro y 5 plg. (12.5 cm) de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min (0.5 plg. /min). La fuerza necesaria para que el pistón

penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada; la definición del CBR es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en un suelo}}{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5mm en la muestra patron}}$$

(Ecuación 2.5)

Valor de resistencia HVEEM (Valor R, AASHTO T-246)

Este ensayo consiste en preparar una muestra cilíndrica de 4" de diámetro y 2.5" de alto envuelta en una membrana y sometida a carga vertical sobre la sección completa de la muestra a una presión dada; con esto se mide la presión horizontal resultante, que es la que sirve para calcular el valor R, para lo cual se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = 100 - \frac{100}{\frac{2.5}{D} \left(\frac{p_v}{p_h} - 1 \right) + 1}$$

(Ecuación 2.6)

Dónde:

P_v = presión vertical aplicada

P_h = presión horizontal en el manómetro

D = desplazamiento horizontal de la muestra, registrado por el número de vueltas de la manivela para pasar de P_h a 7 Kg/cm² (689 KPa o 100 psi)

R se mide para $p_v = 11.2$ Kg/cm² (1102 KPa ó 160 psi)

Ensayo de plato de carga (Valor k, AASHTO T-222)

Este ensayo consiste en cargar un plato y medir la presión necesaria para producir una determinada deformación en el suelo. K es el cociente de dividir la presión (p) aplicada entre de la deformación (Δ) producida en el suelo.

$$K = \frac{p}{\Delta}$$

(Ecuación 2.7)

El valor k está en función del plato de carga, ya que para pavimentos flexibles, se utilizan los diámetros de 30.5 o 45.7 (12'' a 18'').

Penetración dinámica PR con cono

Este ensayo se utiliza para medir en el suelo, la resistencia que tienen los materiales, tanto de estructuras de pavimento como de subrasantes. Este ensayo consiste en hacer penetrar el cono dentro del pavimento o suelo, haciendo que una carga concentrada que funciona como martillo se deje caer repetidamente y se registre la penetración obtenida en cada caída en mm/golpe, denominado cada valor como tasa de penetración dinámica "PR" (Penetration Rate). El valor de PR se relaciona con el CBR de la siguiente forma:

Módulo de resiliencia (Mr)

En el método de AASHTO del 1986 y 1993, reemplaza al CBR por el módulo de resiliencia para utilizarlo como variable para caracterizar la subrasante, subbase y base. El módulo de resiliencia es una medida de la propiedad elástica de los suelos que reconoce a su vez las características no lineales de su comportamiento. El módulo de resiliencia puede ser usado directamente para el diseño de pavimentos flexibles, pero también puede ser convertido a un módulo de reacción de la subrasante (valor k) para el diseño de pavimentos rígidos. En este método de AASHTO se deben usar los valores medios resultantes de los ensayos de laboratorio, ya que la incertidumbre de la confiabilidad (R) debe tomarse en cuenta.

Ya que la humedad en la subrasante es variable en el transcurso del año, es necesario hacer el estudio en las variaciones del módulo de resiliencia (Mr) con respecto a la humedad y poder determinar un Mr promedio de diseño, para lo cual debe realizar lo siguiente:

- I. Es necesario efectuar ensayos de módulo de resiliencia en el laboratorio, en muestras de suelo que representen las condiciones de tensión y de humedad bajo las cuales estarán en el transcurso del año. Con estas pruebas se establece una relación en el laboratorio, de las condiciones entre el módulo de resiliencia y la humedad.

- II. Realizar la determinación del módulo de resiliencia en el lugar, por medio de las deflexiones obtenidas en los pavimentos; el módulo de resiliencia se ajusta para realizar un análisis de las posibles variaciones que existen entre los resultados de laboratorio y los obtenidos en el lugar.
- III. Es posible determinar valores normales (en época seca) del módulo de resiliencia, en función de las propiedades conocidas de los suelos y utilizar relaciones empíricas para calcular las variaciones conforme las épocas del año.

Convenientemente se han reportado factores que pueden ser usados para estimar el módulo de resiliencia (M_r) con el CBR, el valor R y el índice de suelo. Se han dado correlaciones para encontrar el valor del módulo de resiliencia (M_r) como la siguiente relación:

- ✓ $M_r = 1500 \cdot \text{CBR}$ (si el CBR < 10% se utiliza el valor de 1500, aunque este valor puede variar entre 750 a 3000)(**Ecuación 2.8**)

También se encuentra la correlación del valor R (Resistencia de Hveem) y el módulo de resiliencia la cual es:

- ✓ $M_r = A + B \times R$ (Si $R < 20$, el valor de $A=1000$ y $B=555$, aunque A puede variar entre 772 a 1155 y B entre 369 a 555).

(Ecuación 2.9)

2.2.2.6 DRENAJES

El drenaje de agua en los pavimentos, debe ser considerado como un parte muy importante en el diseño de las carreteras ya que el exceso de agua combinado con el incremento de volúmenes de tránsito y cargas, ocasionan daño a las estructuras de pavimento. El agua penetra dentro de la estructura del pavimento por muchos medios, tales como grietas, juntas (en el caso de pavimentos rígidos) o infiltraciones en el pavimento o debido a corrientes subterráneas de un acuífero interrumpido, elevando el nivel freático.

2.2.2.6.1 EFECTOS DEL AGUA SOBRE EL PAVIMENTO

Los efectos que el agua provoca (cuando está atrapada dentro de la estructura) sobre el pavimento se enumeran las siguientes:

- a) Reduce la resistencia de los materiales granulares.
- b) Reduce la resistencia de la subrasante cuando ésta se satura y permanece en similares condiciones durante largos períodos.
- c) Succiona los finos de los agregados de las bases que están bajo los pavimentos flexibles, haciendo que las partículas de suelo se desplacen con los resultados de pérdida de soporte por la erosión.
- d) La degradación de la calidad del material del pavimento por efecto de la humedad, creando desprendimiento de las partículas del mismo.
- e) Los diferenciales que se producen con el desplazamiento dado por el hinchamiento de los suelos.
- f) Por la expansión y contracción debida al congelamiento de los suelos.

2.2.2.6.2 SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS DE HUMEDAD EN PAVIMENTOS

- a) Evitar la penetración de agua dentro del pavimento.
- b) Colocar el drenaje necesario para remover el exceso de agua rápidamente.
- c) Construir pavimentos que resistan los efectos combinados de cargas y agua.

En el diseño de pavimentos, siempre debe hacerse lo posible de que tanto la subrasante, subbase y base estén protegidas de la acción del agua. Al considerar las posibles fuentes de agua, es conveniente proteger la sección estructural de pavimento de la entrada de agua, por lo que es necesario canalizar el agua que corre superficialmente lo mejor posible, así como sellar la superficie del pavimento.

Para lograr obtener un adecuado drenaje para el pavimento, se debe consideraren el diseño, la provisión de tres tipos de sistemas de drenaje para el control o la reducción de los problemas causados por el agua:

- ✓ Drenaje superficial.
- ✓ Subdrenajes.
- ✓ Estructuras de drenaje.

Los métodos de diseño de pavimentos, dependen de la práctica de construir pavimentos que resistan el efecto combinado descargas y agua. Cualquiera de ellos no siempre toma en cuenta los efectos potenciales de destrucción que tiene el agua dentro de la estructura de pavimento; por lo cual se hace un énfasis en la necesidad de expulsar el agua del pavimento y proveer un rápido drenaje.

2.2.2.6.3 CONSIDERACIONES DE DRENAJE EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Realizar un adecuado drenaje mantiene la capacidad soporte de la subrasante (mantiene el valor del módulo de resiliencia cuando la humedad es estable) lo que hacen un carretera de mejor calidad, así como permite en determinado momento el uso de capas de soporte de menor espesor.

En la tabla 2.9, se presentan los tiempos de drenaje que recomienda AASHTO. Dichas recomendaciones se basan en el tiempo que es necesario para que la capa de base elimine la humedad cuando ésta tiene un grado de saturación del 50 %; pero es de hacer notar que un grado de saturación del 85 % reduce en buena medida el tiempo real necesario para seleccionar la calidad de un drenaje.

Calidad del Drenaje	50% saturación	85% saturación
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	de 10 a 15 horas
Muy pobre	El agua no drena	mayor de 15 horas

Tabla 2.9: Tiempos de drenaje para capas granulares

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

2.2.2.6.4 COEFICIENTES DE DRENAJE PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES (m_x)

La calidad del drenaje es expresado en la fórmula del número estructural, por medio del coeficiente de drenaje (m_x), que toma en cuenta las capas no ligadas.

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Tabla 2.10: Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles (m_x)

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

Selección del coeficiente de drenaje (m_x)

Para seleccionar el coeficiente de la tabla 2.10, es necesario seguir las siguientes indicaciones:

- 1) Se debe calcular el tiempo de drenaje de cada una de las capas no ligadas para pavimentos flexibles.
- 2) Se selecciona una calidad de drenaje en función del tiempo de drenaje calculado.
- 3) Se calcula el tiempo en que la estructura de pavimento va a estar expuesta a niveles de humedad próximos a saturarse.
- 4) Con la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo en que el pavimento va a estar expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación, se selecciona el coeficiente de drenaje m_x .

Tiempo de drenaje

Existen dos formas de calcular el tiempo de drenaje para la capa de un pavimento, las cuales son: la aproximación del tiempo para drenar y la del caudal constante. En el primero, el método del tiempo para drenar se considera únicamente el agua que se infiltra y en el segundo se

considera las fuentes de ingreso y egreso y las mismas son cuantificables y la base permeable se dimensiona para conducir los caudales de diseño. A continuación se describe cada uno de ellos.

Método del tiempo para drenar

El agua lluvia que se infiltra en la superficie de un pavimento, llega hasta el nivel de la base, la cual al estar en contacto con ella la satura completamente; en este proceso de saturación llega el momento en que la estructura de pavimento al saturarse completamente, ya no permite el ingreso de agua dentro de ella, entonces el agua que sigue tratando de penetrar se escurre sobre la superficie; de aquí que se debe tomar muy en cuenta que la base debe ser perfectamente permeable, ya que una vez termina de llover, el agua debe escurrirse de la base lo más rápido posible, con el objeto de que la saturación de los materiales no cambie las características mecánicas de la capa.

Es conveniente que la estructura del pavimento se drene en un lapso de media o una hora como máximo, esto con el objeto de que el posible daño que se pueda generar sea el mínimo, por el efecto que se produce el permanecer mucho tiempo en presencia de la humedad. El tiempo necesario para que el agua se escurra de los materiales, depende en buena forma del posible daño que se pudiera ocasionar y las condiciones climáticas de la zona.

Los datos necesarios para efectuar el análisis con respecto a la geometría de una base permeable deben ser:

- ❖ Pendiente longitudinal (S)
- ❖ Pendiente transversal (S_x)
- ❖ Espesor de la capa a drenar (h)
- ❖ Ancho de la base permeable (b)

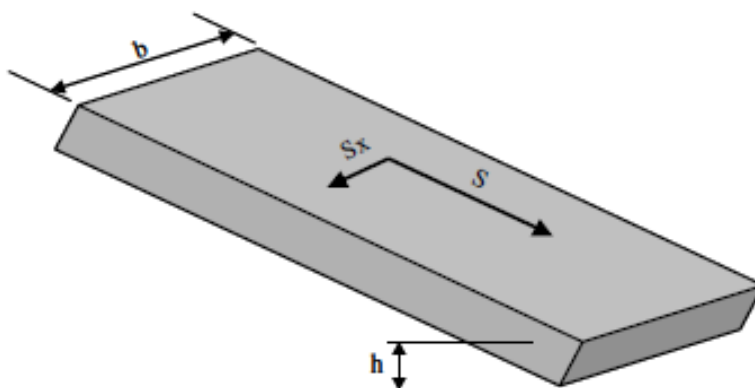


Figura 2.17: Geometría de una base permeable

Fuente: figura 6.1 del Manual Centroamericano para Diseño de pavimentos

$$\text{Longitud resultante de la base: } L_r = b [(S / S_x)^2 + 1]^{0.5}$$

(Ecuación 2.10)

$$\text{Pendiente transversal resultante de la base: } S_r = (S^2 + S_x^2)^{0.5}$$

(Ecuación 2.11)

$$\text{Factor de pendiente longitudinal: } S = (L_r \times S_r) / b$$

(Ecuación 2.12)

$$\text{La gravedad específica (Gs) de los sólidos es: } G_s = W_s / V_s$$

(Ecuación 2.13)

Dónde:

W_s = Peso específico de los sólidos

V_s = Volumen total de los sólidos

Para realizar la cuantificación de las propiedades drenantes de un pavimento es necesario realizar los siguientes cálculos:

- Calcular $V_s = W_s / G_s$

(Ecuación 2.14)

- Calcular $V_v = V_1 - V_s = N_{\text{max}}$ (Volumen de agua que llena completamente los vacíos del material)

(Ecuación 2.15)

- Seleccionar la pérdida de agua C de la tabla 2.11

Material predominante	Cantidad de finos								
	< 2.5%			2.5% - 5%			5% - 10%		
	Tipo de finos			Tipo de finos			Tipo de finos		
	Filler	Limo	Arcilla	filler	limo	Arcilla	filler	limo	Arcilla
Grava	70	60	40	60	40	20	40	30	10
Arena	57	50	35	50	35	15	35	18	- 8

Tabla 2.11: Cantidad de agua que puede drenar por gravedad

Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1994

- Calcular la porosidad efectiva (N_c):

$$N_c = N_{\max} C / 100$$

(Ecuación 2.16)

La porosidad efectiva (N_c): es la relación entre el volumen de agua que drena de un material por efecto de la gravedad y el volumen total de ese material. Es la medida de la cantidad de agua que puede ser drenada de un suelo.

Calcular M_x (coeficiente de drenaje para pavimento flexible):

$$M_x = N_c x L r^2 / (h x k)$$

(Ecuación 2.17)

La permeabilidad k se determina con el ábaco de la figura 2.18

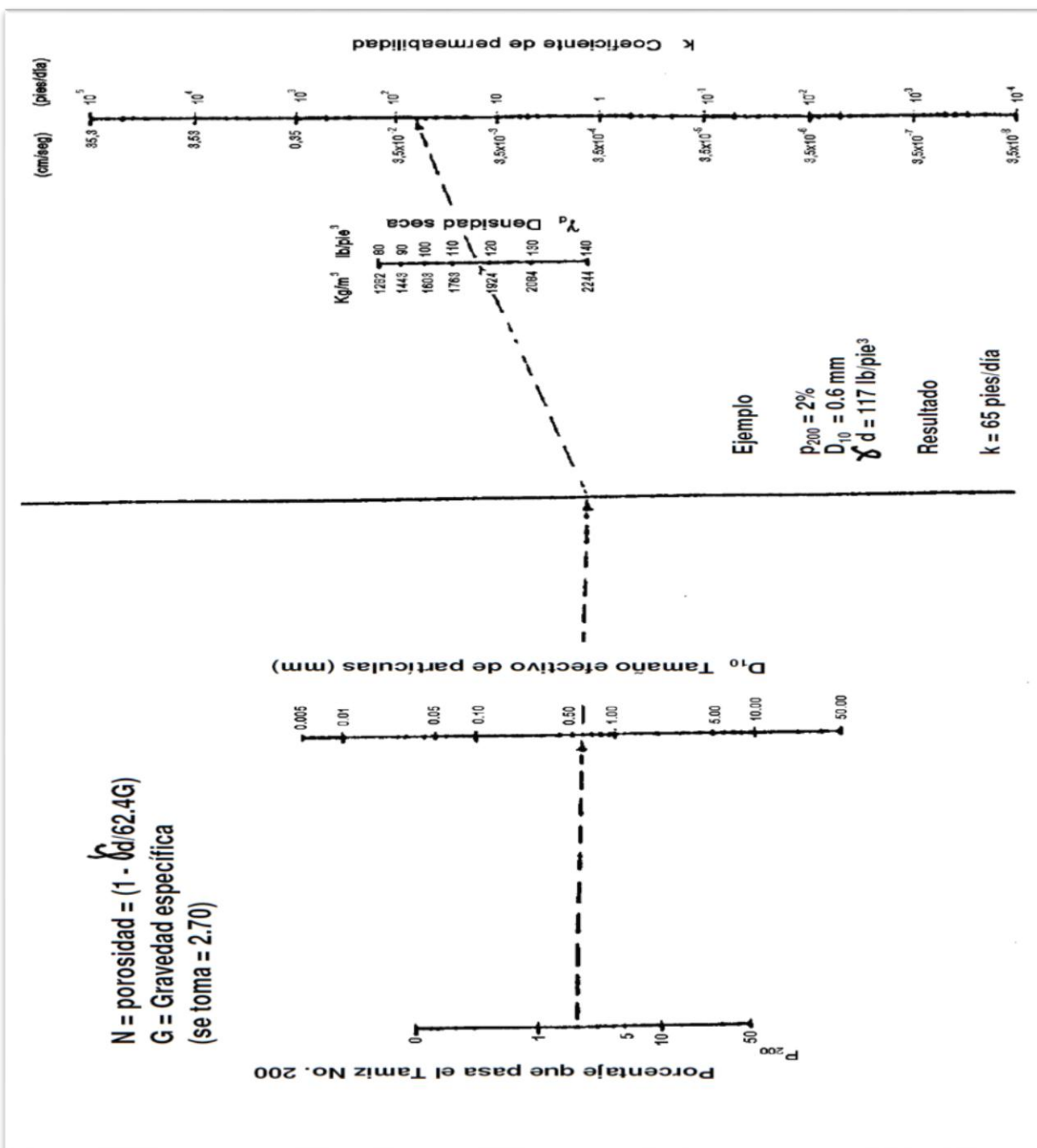


Figura 2.18: Abaco para obtener la permeabilidad k

Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1994

2.2.2.7 COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA

Para encontrar los valores de los coeficientes estructurales de capa (a_x), se utiliza las figuras siguientes la cuales se encuentran en función del módulo elástico del concreto asfáltico y los módulos de resiliencia de la base y la subbase.

En la figura 2.19 conociendo el módulo de elasticidad se traza hacia arriba una línea la cual se interceptara con la línea de pivote y de allí horizontalmente hacia la izquierda para encontrar el valor correspondiente de a_1 .

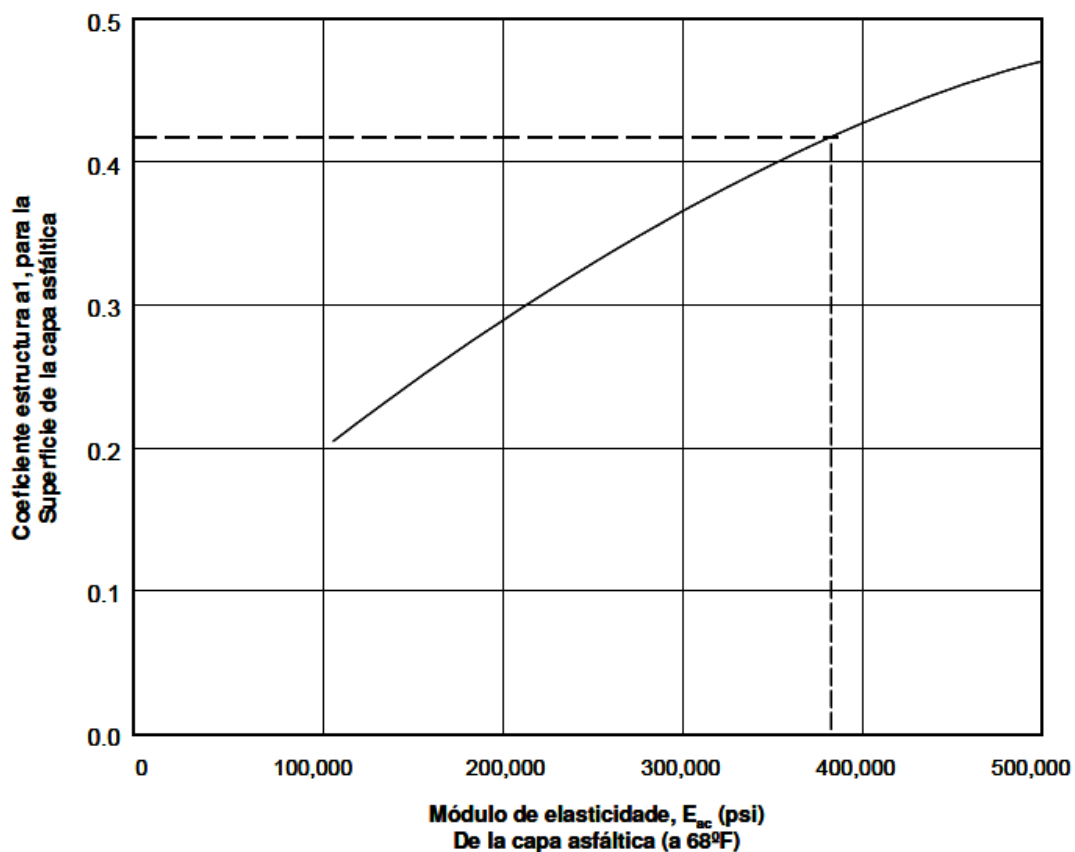


Figura 2.19: Coeficiente estructural a partir del Módulo elástico de la mezcla asfáltica
Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Para determinar el valor de coeficiente de capa a_2 de las bases trituradas o granulares, se usa la figura 2.20, en la línea vertical del lado derecho se intercepta el valor conocido que puede ser CBR, Valor R, Triaxial Texas o Modulo de la capa, luego horizontalmente se traza una línea hasta encontrar la línea vertical del extremo izquierdo e interceptar el valor de a_2 .

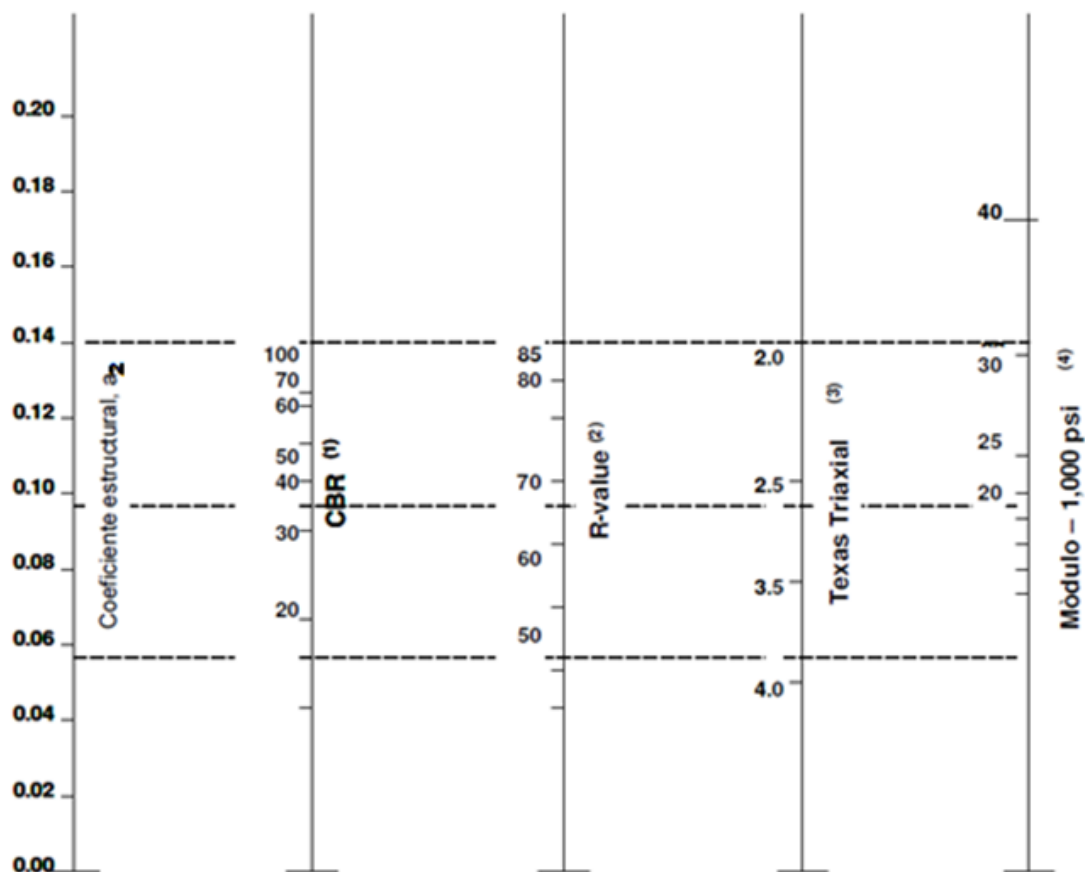


Figura 2.20: Variación en el coeficiente estructural de la capa de base

- (1) La escala derivò haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de Illinois
 (2) La escala derivò haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de California, New Mèxico y Wyoming
 (3) La escala derivò haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de Texas
 (4) La escala derivò en el proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Cuando se utilicen bases estabilizadas el coeficiente estructural se calcula conforme la Figura 2.21.

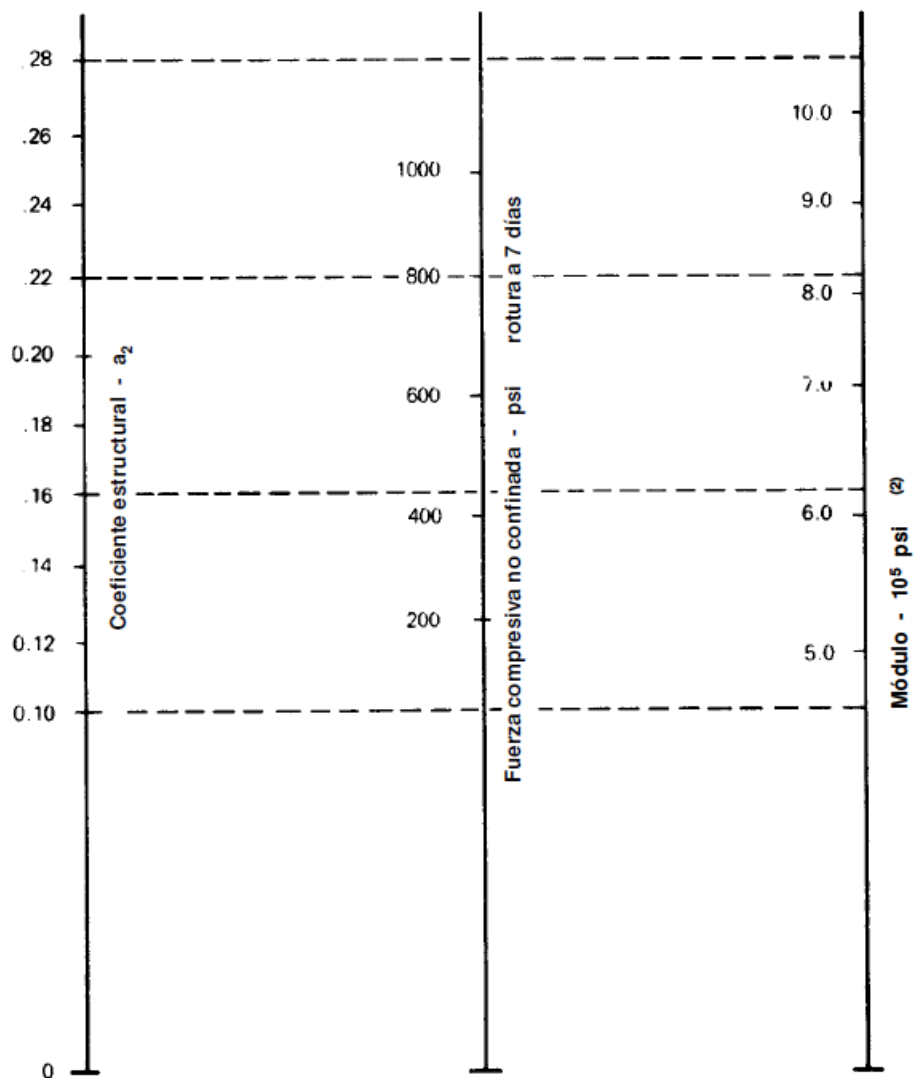


Figura 2.21: Variación en el coeficiente estructural de la capa de base estabilizada

(1) Escala derivada de los porcentajes obtenidos de las correlaciones de Illinois, Louisiana y Texas

(2) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO

Para encontrar el valor del coeficiente de capa a_3 en la subbase se utiliza la figura 2.22; la línea vertical del lado extremo derecho se intercepta el valor conocido, luego horizontalmente se traza una línea hasta encontrar la línea vertical del extremo izquierdo, lo cual intercepta el valor de a_3 .

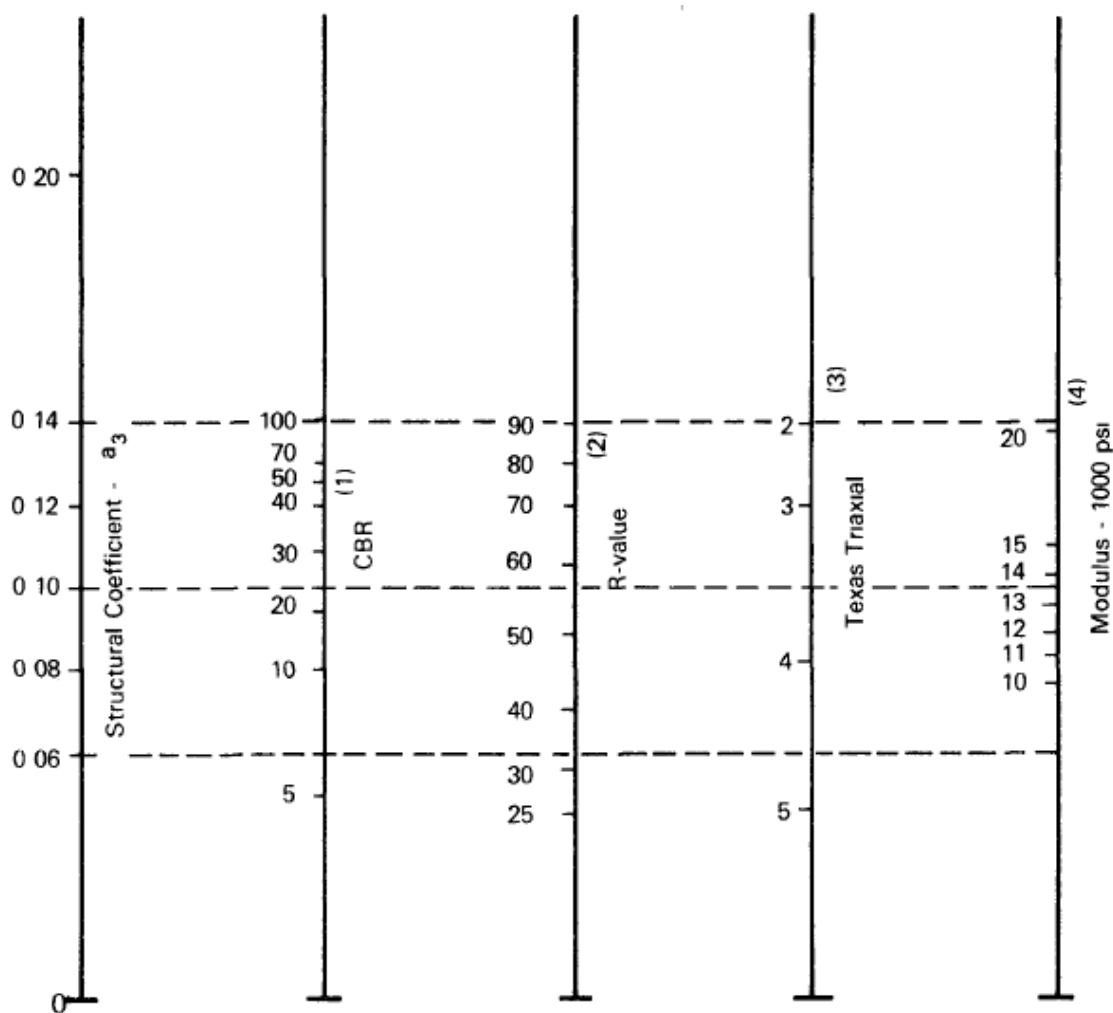


Figura 2.22: Variación en el coeficiente estructural de la capa de subbase

(1) Escala derivada de las correlaciones de Illinois

(2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, New México y Wyoming

(3) Escala derivada de las correlaciones de Texas

(4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

2.2.3 DETERMINACIÓN DE ESPESORES.

En los pavimentos de mezclas asfálticas por medio de la fórmula de diseño se obtiene el número estructural (SN) y en función del mismo se determinan los distintos espesores de las capas que conforman el paquete estructural; el diseño está basado en la identificación del número estructural del pavimento flexible y la cantidad de ejes de carga transitando.

2.2.3.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO

En la figura 2.23 se presenta el ábaco por medio del cual se obtiene el número estructural. Las variables para determinar el número estructural de diseño requerido son las siguientes:

- La cantidad estimada de ejes equivalentes (ESAL's) por carril, para el período de diseño.
- La confiabilidad (R).
- El conjunto total de las desviaciones estándar (So) se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los intervalos siguientes:
 - Para pavimentos flexibles 0.40-0.50
 - En construcción nueva 0.35-0.40
 - En sobre-capas 0.50
- El módulo de resiliencia efectivo (que tome en cuenta las variaciones a lo largo del año) de la subrasante (Mr).
- La pérdida de serviciabilidad

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

(Ecuación 2.18)

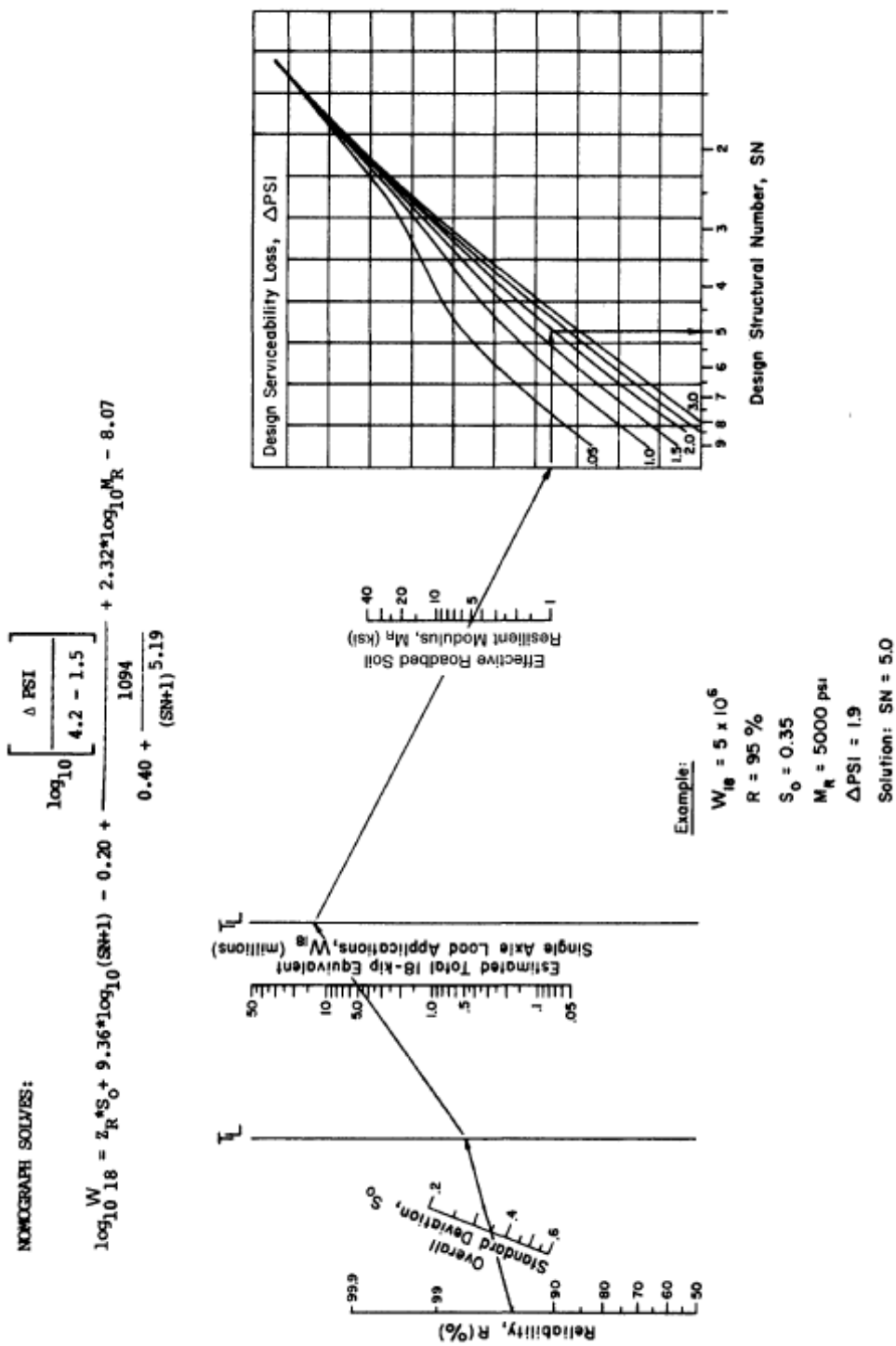


Figura 2.23: Ábaco utilizado para la obtención del Numero Estructural (SN)
 (Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1993)

La manera para la utilización del ábaco, en la cual se aplican determinadas condiciones específicas para el diseño de un pavimento; cuando se tienen o asumen estos valores, el número estructural obtenido, es aquel que es necesario para las condiciones específicas que conforman un paquete estructural.

La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de cada capa de la estructura del pavimento es:

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3$$

(Ecuación 2.19)

Dónde:

- ✓ a1, a2 y a3 representan los coeficientes estructurales o de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.
- ✓ m2, m3 representan los coeficientes de drenaje para base y subbase
- ✓ D1, D2 y D3 representan los espesores de capa de la superficie de rodadura, base y subbase (en pulgadas)

2.2.3.2 ESTABILIDAD Y FACTIBILIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN

No deben colocarse capas con espesores menores que los mínimos requeridos, ya que con esto las capas con espesores mayores que el mínimo tienden a ser más estables. Frecuentemente se especifica un valor mayor en el espesor de capas, con el objeto de mantener la estructura de pavimento en mejores condiciones para absorber los efectos que producen los suelos expansivos.

Cuando se utilicen como capa de rodadura tratamientos superficiales, no se consideran ningún aporte estructural de esta capa; pero tiene un gran efecto en la base y la subbase ya que esto impermeabiliza la superficie y no permite la entrada de agua a la estructura de pavimento.

Los valores de los espesores mínimos sugeridos para capas asfálticas y base granular en función del tránsito se presentan en la tabla 2.12.

Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 – 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 – 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Tabla 2.12:Espesores mínimos sugeridos según el transito

Fuente: Guía para diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993.

2.2.3.3 ESPESORES MÍNIMOS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO ESTRUCTURAL

Las capas granulares no tratadas, deben de estar perfectamente protegidas de presiones verticales excesivas, las cuales pueden llegar a producir deformaciones permanentes. El proceso para la determinación del espesor de las capas es el siguiente:

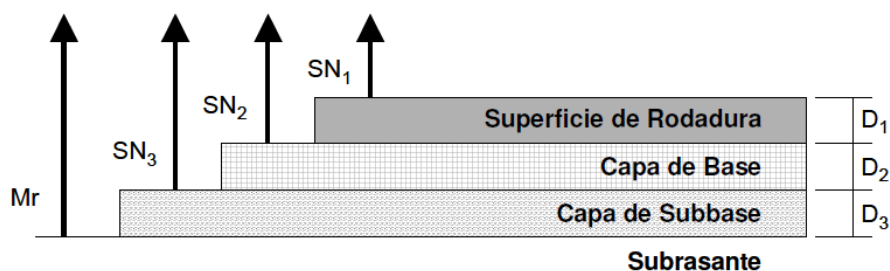


Figura 2.24:Representacion del numero estructural (SN) y espesores (D) de la estructura él un pavimento.

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Para evitar las deformaciones excesivas producidas en las capas de la estructura del pavimento, los materiales son seleccionados para cada capa así: Superficie de rodadura, base granular y

subbase con buen CBR, límites, etc. Para cada uno de los materiales se deben conocer los módulos de resiliencia.

Se pueden encontrar los números estructurales requeridos (ábaco de la figura 2.24) para proteger cada capa no tratada, reemplazando el módulo de resiliencia de la capa superior por el módulo de resiliencia de la capa que esta inmediatamente abajo; así, para la determinación del espesor D_1 de la capa asfáltica se supone un M_r igual al de la base y así se obtiene el SN_1 , que debe ser absorbido por dicha capa. El espesor D_1 debe ser calculado así:

- ❖ Valor mínimo que se requiere para la capa asfáltica.

$$D > SN_1 / a_1$$

(Ecuación 2.20)

- ❖ Valor real que debe ser usado

$$D_1^* \geq SN_1 / a_1$$

(Ecuación 2.21)

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* \geq SN_1$$

(Ecuación 2.22)

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

(Ecuación 2.23)

- ❖ a , D , m , y SN son los valores mínimos requeridos.
- ❖ El asterisco (*) en D o SN indica y representa el valor actualmente usado, que debe ser igual o mayor al valor requerido.

Se toma un espesor D_1^* ligeramente mayor y el número estructural absorbido por esta capa es:

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^*$$

(Ecuación 2.24)

Para la determinación del espesor mínimo de la base, se entra al ábaco con el M_r de la subbase y entonces se obtiene el SN_2 , a ser absorbido por el concreto asfáltico y la base. Así:

$$D_2^* \geq (SN_2 - SN_1^*) / a_2 \times m_2$$

(Ecuación 2.25)

Se toma un espesor ligeramente mayor, D_2^* , y el número estructural que será absorbido es:

$$SN_2^* = a_2 \times m_2 \times D_2^*$$

(Ecuación 2.26)

El último es la subbase, que se entra con el Modulo de Resiliencia (M_r) correspondiente a la subrasante y se obtiene $SN_3 = SN$ para todo el paquete estructural calculado para la capa asfáltica, base y subbase. En este caso el espesor es:

$$D_3^* \geq (SN - (SN_1^* + SN_2^*)) / (a_3 \times m_3)$$

(Ecuación 2.27)

Se adopta un espesor ligeramente mayor D_3^* y se obtiene el número estructural absorbido por la subbase.

$$SN_3^* = a_3 \times m_3 \times D_3^*$$

(Ecuación 2.28)

Como verificación tenemos:

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* \geq SN$$

(Ecuación 2.29)

Este resultado que representa la ecuación 2.29, es que el número estructural total debe ser como mínimo igual o mayor a la suma de los números estructurales de cada capa, el criterio es que cada capa de la estructura del pavimento queda protegida de los esfuerzos a los cuales va a ser sometida.

2.3 ALTERNATIVA DE DISEÑO IMT-PAVE

2.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA IMT-PAVE

Como hemos visto anteriormente la tendencia mundial es la aplicación de conceptos mecanicistas al diseño de pavimentos, tanto para pavimentos rígidos como flexibles alrededor del mundo, debido a ello se buscan alternativas de diseño al método AASTHO MEPDG para países tropicales como el nuestro, las condiciones son diferentes por lo que una calibración o alternativa del método mecanicista empírico de la AASTHO es necesaria para nuestras latitudes.

El Instituto Mexicano del Transporte, ha creado una herramienta para el cálculo estructural de pavimentos flexibles, la cual crea un entorno muy amigable para la introducción de datos e interpretación de respuestas, dicha herramienta es denominada IMT-PAVE, de la cual se conocen dos versiones hasta el momento IMT-PAVE 1.1 e IMT-PAVE 1.2.

Esta herramienta se basa en el análisis de espectros de carga y espectros daño, los espectros son considerados una representación realista de la representación de las cargas. Un Espectro de Carga se define como la relación entre el número de un tipo de eje, expresado en porcentaje, por lo que usualmente se calculan para cada eje: sencillo, sencillo dual, tándem y trídem, por lo que es una manera muy eficiente de caracterización en términos de tipos de ejes y su respectivo daño.

También se fundamenta en los principios de la mecánica de pavimentos, considerando propiedades elásticas de los materiales que conforman los espesores de las capas, se calculan respuestas críticas de un pavimento flexible, a una determinada profundidad de sección transversal (esfuerzos y deformaciones), que luego son traducidas en acumulación de daño en el tiempo, de ese modo se puede predecir la vida útil del pavimento flexible, cumpliendo así con la evaluación del “desempeño” del pavimento flexible, el cual es un concepto primordial para las metodologías mecanicistas empíricas.

2.3.2 VARIABLES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE EL IMT-PAVE.

Los principales variables a tomar en cuenta para la aplicación de IMT-PAVE son los siguientes:

1-Tránsito Vehicular

2-Factores Climáticos

3-Estructura del Pavimento

4- propiedades de los materiales.

La vida de diseño de un pavimento está directamente relacionada con la interacción de las variables antes mencionadas, así la calidad de los procesos constructivos, por lo que es muy importante un excelente control de calidad para que lo que se reflejado en carpetas técnicas, planos constructivos y especificaciones no difiera en gran medida del resultado final en la ejecución de pavimentos. Así también un buen programa de mantenimiento es de suma importancia, lo ideal es que se creen programas de mantenimiento para el horizonte del proyecto, a modo de conocer de antemano un presupuesto, y así poder programar actividades y recursos a lo largo de la vida prevista del pavimento.



Figura 2.25: Efecto del deterioro del pavimento

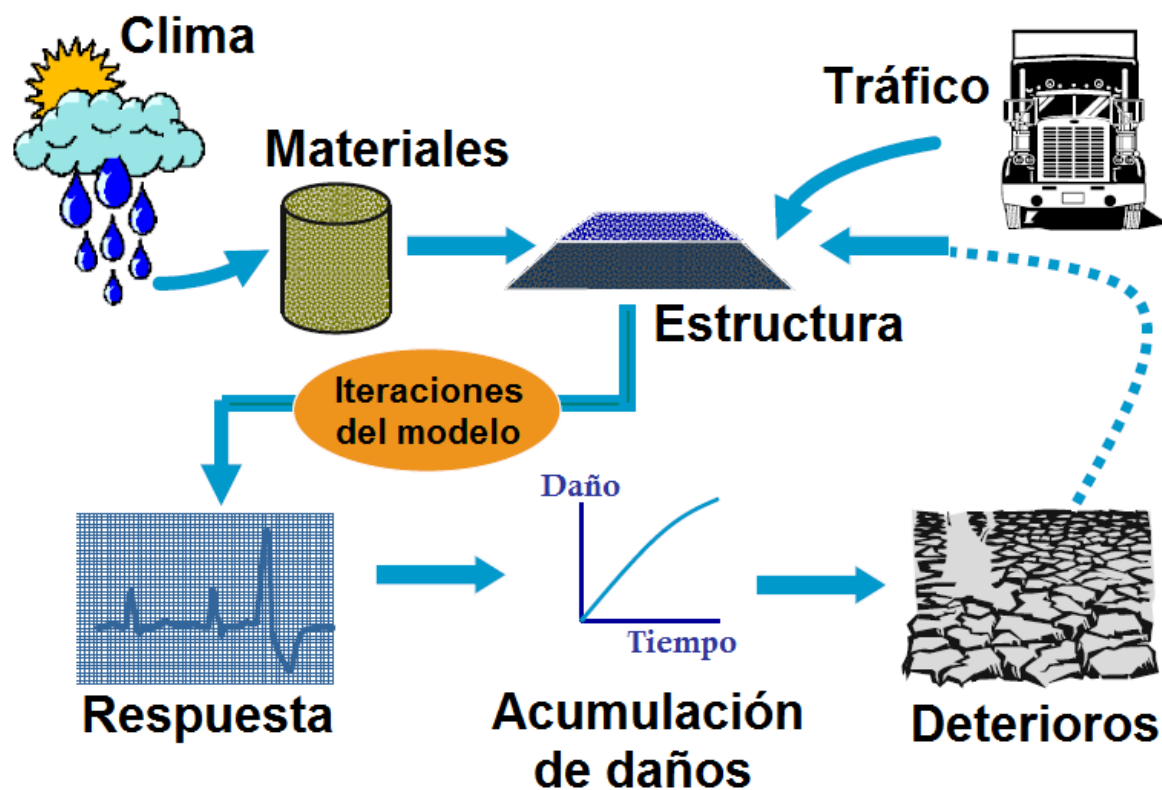


Figura 2.26: Interacción de las distintas variables asociadas al diseño de pavimentos, y su desempeño en el tiempo.

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez

La estructura y propiedades de los materiales incluyen los espesores propuestos para cada capa, su resistencia y propiedades elásticas. El tráfico debe incluir el eje y la configuración de la rueda, la carga y magnitud de la carga, además del número de repeticiones aplicadas al pavimento. Los dos factores anteriores derivan, con base en un modelo estructural (teoría elástica multicapa)

La respuesta estructural del pavimento, permite proseguir con la segunda etapa del diseño, la predicción del desempeño del pavimento con base en los criterios de falla que permiten la incorporación de la respuesta estructural. Los factores ambientales se refieren principalmente a regímenes de temperatura y precipitación, el drenaje y humedad, que afectan las propiedades de los suelos y otros materiales en el tiempo.

Los factores antes mencionados representan los principales componentes que afectan el diseño de pavimentos, el proceso de caracterización y análisis se traduce en una propuesta estructural que sólo puede lograrse con la disposición de un modelo de diseño con el que se pueda evaluar los insumos (solicitaciones y materiales) y la respuesta del pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones). He ahí el origen y razón del IMT-PAVE.

2.3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO.

2.3.3.1 PARÁMETROS DE ENTRADA AL IMT-PAVE

Podemos definir un parámetro como un dato que es considerado como imprescindible y orientativo para lograr evaluar o valorar una determinada situación, para la evaluación y diseño de pavimentos mediante el IMT-PAVE, se consideran distintos parámetros a mencionar a continuación:



Figura 2.2: Mensaje de bienvenida de la herramienta IMT-PAVE 1.2

2.3.3.2 TRANSITO

Para la caracterización del tráfico, Se consideran circulación de camiones cargados en términos de ejes de espectro de carga. Dichos espectros se clasifican de en ejes: sencillo, sencillo dual, tándem y trídem. El enfoque de ESAL's usado por el método AASHTO, no es utilizado como un dato de entrada, sin embargo el programa genera el número dicho dato, como el porcentaje representativo de cada eje representado (sencillo, dual, tándem y trídem), y el número de repeticiones admisibles.

2.3.3.3 DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TRANSITO

2.3.3.3.1 TPDA (VEHÍCULOS/DÍA)

El primer año que el segmento permanecerá abierto al tráfico, es el año para el cual el dato de TPDA será introducido, lo cual normalmente se realiza por medio de conteos manuales, o aproximación de datos a carreteras que tengan iguales condiciones de afluencia de tránsito.

Transito Promedio Diario (TPD): Es el volumen de tránsito durante un período de tiempo, dividido por el número de días del período.

Abreviadamente se denota como TPD. Según el período utilizado para medir el volumen de tránsito, el TPD puede ser anual, mensual o semanal, denominándose TPDA, TPDM y TPDS, respectivamente.

2.3.3.3.1 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR SENTIDO (FDS)

Para ello se debe conocer el porcentaje de tránsito que utiliza el carril de diseño, para ello se debe analizar detenidamente hacia qué dirección fluirá la mayor cantidad de tránsito pesado, para poder entender claramente este factor, cabe mencionar un ejemplo: en una carretera hacia un puerto, pueden llegar muy cargadas las rastras a dejar distinta mercadería pesada, la cual será trasladada posteriormente por vía marítima, en su regreso de dicha carretera regresará el cabezal mucho menos cargado, por lo que el carril en dirección hacia el puerto, tendría un mayor factor de distribución por carril. Por lo general el porcentaje de distribución por sentido es del 50 %, dependiendo del lugar puede variar entre un 30% y un 70%.

2.3.3.3.2 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL (FDC)

Otro de los parámetros importantes en la introducción de datos, es el FDC, el cual debe representar el carril de diseño, el cual será el que recibe el mayor número de cargas de tránsito, es decir el mayor número de ESAL's, Para una carretera de dos carriles cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que forzosamente el tránsito en cualquier dirección se canalizaría por el carril correspondiente a su sentido, no así para carreteras de más de un carril por sentido, para lo cual la guía AASHTO 93, recomienda el uso de la siguiente tabla:

<i>Número de carriles en una sola dirección</i>	<i>Porcentaje de ESAL's en carril de diseño</i>
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

*Tabla 2.13: Factores de distribución por carril según Guía AASHTO 93.
Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de Pavimento. AASHTO, 1993. Pag. II-9*

2.3.3.3.3 HORIZONTE DE PROYECTO

Está determinado por el tiempo estipulado para el cual, se planea la duración de la carretera, por lo que al entrar los años de vida y la tasa de crecimiento, se están introduciendo el número de repeticiones equivalentes de carga, que se espera circulen por el carril de diseño.

2.3.3.3.4 VIDA (AÑOS)

Acá se introduce el número de años para los cuales se pretende el funcionamiento de la vía lo cual para nuestro país normalmente, se diseñan para 20 años.

2.3.3.3.5 TASA DE CRECIMIENTO (%)

Es el incremento anual del volumen de tránsito en una vía, expresado en porcentaje. Se determina en base a los datos de las estaciones de conteo, extrapolando la tendencia de los datos estadísticos.

2.3.3.3.6 CLASIFICACIÓN VEHICULAR

Partiendo del conteo vehicular y su correspondiente clasificación, se introducen los porcentajes correspondientes.

Microsoft Excel - IMT-PAVE 1.2

TRÁNSITO

IMT-PAVE

TDPA (veh/día)

FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR:
 SENTIDO (FDS) =
 CARRIL (FDC) =

HORIZONTE DE PROYECTO
 Vida (años) =
 Tasa crecimiento (%) =

Volumen de tránsito para el horizonte de proyecto		
	Porcentaje representativo %	Num de repeticiones promedio (Ejes/Año)
SENCILLO	42.7	214,543
DUAL	17.1	85,817
TANDEM	36.6	183,894
TRIDEM	3.7	18,389

CLASIFICACIÓN VEHICULAR (%)









A	<input type="text" value="63"/>	
B2	<input type="text" value="5"/>	
B3	<input type="text" value="1"/>	
C2	<input type="text" value="9"/>	
C3	<input type="text" value="10"/>	
T3-S2	<input type="text" value="6"/>	
T3-S3	<input type="text" value="3"/>	
T3-S2-R4	<input type="text" value="1"/>	
Otros	<input type="text" value="2"/>	
Suma	100.0	

Figura 2.28: Introducción de datos de tránsito.

Habiendo introducido cada uno de los datos descritos anteriormente, el programa automáticamente arroja, los datos correspondientes al desglose en tipo de ejes (Sencillo, Sencillo Dual, Tándem y Trídem), su porcentaje representativo, y el número de repeticiones promedio, lo que corresponde a valores de ESAL's para cada tipo de ejes

2.3.3.4 GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA

2.3.3.4.1 NIVEL DE CARGA

Es necesario especificar el nivel de carga para el cual se busca la generación de los espectros de carga, (definidos anteriormente), los cuales tendrán una gran influencia en los espesores finales del pavimento a proponer, los niveles de carga, se clasifican de la siguiente manera:

a) Legal:

Representa el nivel de carga, el cual está establecido legalmente en cada país, el cual no debería ser sobrepasado y legalmente constituye una falta legal, la circulación con una carga superior al establecido en el reglamento de transporte de carga de nuestro país.

b) Ligera sobrecarga

Representa un leve aumento en la carga legal.

c) Alta sobrecarga

Representa un aumento muy significativo en la carga legal

d) Muy alta sobrecarga

Así como la ligera y alta sobrecarga representan aumentos en la carga legal, como su nombre lo indica esta es una muy alta sobrecarga, situación no aconsejable en el tráfico, mas sin embargo, es muy común tener muy altas sobrecargas en el tránsito, ya que se excede la capacidad de carga de los diferentes vehículos de transporte pesado.

e) Avanzado

Esta pestaña, nos permite la personalización de espectros de carga, generando histogramas de acuerdo a los cuatro tipos de ejes considerados (sencillo, sencillo dual, tándem y trídem), luego de un ajuste de espectros de carga, se puede llegar a los 36 parámetros a introducir, teniendo así un espectro personalizado.

Sencillo direccional			Sencillo dual		
W1	M1	S1	W1	M1	S1
1	1	0.2	1	1	0.3
W2	M2	S2	W2	M2	S2
0	0	0	0	0	0
W3	M3	S3	W3	M3	S3
0	0	0	0	0	0

Tandem			Tridem		
W1	M1	S1	W1	M1	S1
1	1	0.4	1	1	0.5
W2	M2	S2	W2	M2	S2
0	0	0	0	0	0
W3	M3	S3	W3	M3	S3
0	0	0	0	0	0

Figura 2.29: Ventana para la opción de personalización de espectros de carga.

f) Límite legal de carga

Al seleccionar el límite legal de carga, se mostrarán los umbrales que rigen para cada tipo de eje en la normativa vigente y por lo tanto se puede determinar de manera gráfica el nivel de exceso de carga por cada eje.

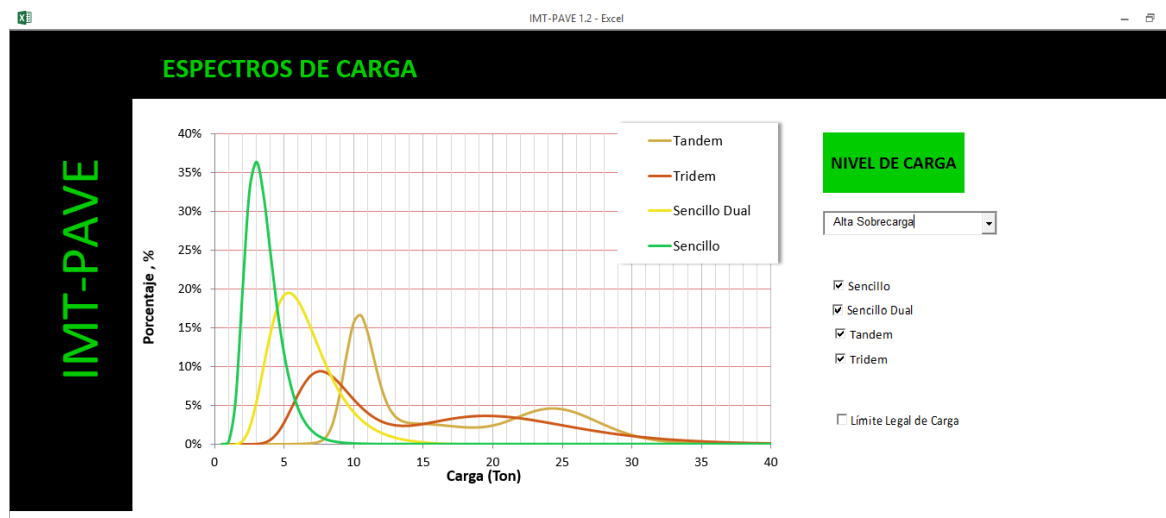


Figura 2.30: generación de espectros de carga (sencillo, sencillo dual, tándem y tridem)

Generación de espectros:

La generación de espectros de carga es realizada por cada tipo de eje, los cuales son los siguientes:

Eje Sencillo: Es un eje simple en cuyos extremos lleva una sola rueda



Figura 2.31: Ejes sencillos (una rueda por extremo)

Eje Sencillo Dual: Es un eje simple el cual en cada uno de sus extremos lleva dos ruedas.



Figura 2.32: Ejes tándem (eje simple con dos ruedas en cada extremo)

Eje Tándem: Es aquel constituido por dos ejes sencillos con rueda doble en sus extremos



Figura2.33: Ejes tándem

Eje Trídem: Es aquel constituido por tres ejes sencillos con rueda doble en sus extremos



Figura2.34: ejes trídem

2.3.3.5 ANALISIS ESPECTRAL

ANÁLISIS ESPECTRAL

Numero de capas: 4

MODELO DE DETERIORO
 FATIGA: IMT
 DEFORMACIÓN PERMANENTE: IMT

IMMI-PAVE

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

No. Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	CARPETA	14	3500
2	base	20	300
3	Subbase	35	150
4	subrasante		100
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Análisis Espectral

vida por fatiga (años) 14.9
 vida por deformación (años) 13.3

Espectros Daño Deformación Espectros Daño Fatiga Daño Acumulado Deformación Daño Acumulado Fatiga

Figura 2.35: Introducción de estructura y propiedades del pavimento.

2.3.4 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

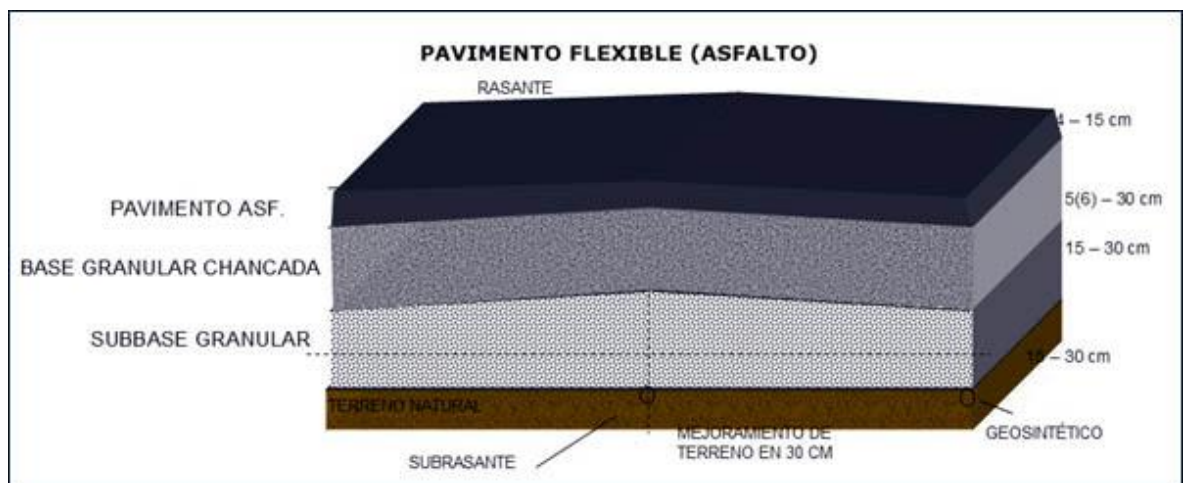


Figura 2.36: Corte transversal típica de la estructura de un pavimento flexible.

Esta ventana nos permite la propuesta de una estructura, a modo de buscar espesores que cumplan con las exigencias estructurales y que a la vez sea económicamente viable, por lo que prácticamente se entra en una fase de prueba y error.

Número de Capas:

Se debe elegir un número de capas para el pavimento flexible, la subrasante se toma como una capa de espesor infinito, las opciones pueden ser tres capas carpeta, base y subrasante, o cuatro capas a definir carpeta, base, subbase y subrasante.

Estructura del pavimento

Continuamos con la definición del espesor como característica geométrica del pavimento, para lo cual, en base a experiencia de diseños conocidos o similares, se puede proponer un diseño, sin embargo hay tablas que nos pueden guiar para una proposición más certera.

2.3.4.1 MATERIALES GRANULARES: (BASE, SUBBASE Y SUBRASANTE).

Para el diseño de los espesores de una sección estructural del pavimento flexible, el IMT-PAVE, considera como parámetro fundamental, dentro de la evaluación de los materiales, la obtención del Módulo de Resiliencia (Mr). Sin embargo, sabiendo que no todos los organismos, dependencias o instituciones cuentan con el equipo adecuado para llevar a cabo dicha prueba, se opta muchas veces por el uso de factores de correlación entre el Módulo de Resiliencia (Mr) y la prueba de CBR (Valor Relativo de Soporte), el cual está estandarizado en la norma AASHTO T-193, es de mencionar que los resultados son bastante aproximados; pero para un diseño más eficiente lo recomendable es realizar un ensayo de Módulo de Resiliencia, el ensayo del Módulo de Resiliencia para su elaboración se recomienda el uso del método MS-10 del Instituto del Asfalto.

CLASIFICACION DEL SUELO	RANGO DE Mr (MPA)	VALORES TIPICOS DE Mr (MPA)
CH	34-90	55
CH + CAL	100-200	150
MH	55-120	80
CL	90-165	117
ML	50-100	75
SW	193-259	220
SP	166-228	193
SW-SM	166-228	193
SP-SC	148-214	176
SP-SM	166-228	193
SC	148-214	176
SP-SM	166-228	193
SC	148-193	166
SM	193-259	221
GW	273	350
GW	273-350	310
GW+CEMENTO	750-2000	1500
GW+ASFALTO	500-1500	1000
GP	245-300	270
GW-GC	193-276	238
GW-GM	245-279	266
GP-GC	193-269	235
GP-GM	214-276	252
GC	166-259	214
GM	228-290	266

Tabla 2.14: Valores típicos del módulo de resiliencia, Mr, para suelos clasificados con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S.

Fuente: Manual SCT M-MMP-1-02/03

Algunos Factores Recomendados de Correlación para materiales de subrasante.

$$Mr \text{ (Mpa)} = 10.3 \text{ CBR}$$

(Ecuación 2.30)

$$Mr \text{ (psi)} = 1,500 \text{ CBR}$$

(Ecuación 2.31)

Ensayo	AASHTO	ASTM
Límite líquido	T-89	D-4318
Límite Plástico	T-90	D-4318
Índice Plástico	T-90	D-4318
Granulometría	T-88	D-422
Compactación	T-180	D-1157
Valor CBR	T-193	D-1883
Valor R	T-190	D-2844

Tabla 2.15: Parámetros según AASHTO y ASTM para los siguientes parámetros

PRUEBA	REQUISITOS SUBBASE	REQUISITOS BASE
CBR mínimo	20	80
Valor R, mínimo	55	78
Límite líquido, máximo	25	25
Índice Plástico, máximo	6	NP
Equivalente de arena, mínimo	25	35
Material que pasa la malla 200, máximo (finos)	12	7

Tabla 2.16: Valores recomendados para diferentes pruebas, con materiales de bases y subbases.

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez

IMT	SUB-BASE	BASE
% finos	15-25	10-15
Límite Líquido	25-30	25-30
Índice Plástico	6-10	6-6
CBR	25-30	25-30

Tabla 2.17: Valores recomendados por el instituto mexicano del transporte.

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez.

2.3.4.2 CARPETA ASFÁLTICA.

El parámetro para la calificación mecánica de la carpeta asfáltica está determinada por su módulo dinámico, el cual puede ser determinado por ensayos de laboratorio reproduciendo la mezcla de diseño en laboratorio para pavimentos nuevos y/o bien extrayendo y evaluando núcleos en caso de que el pavimento ya esté construido.

MATERIAL	RANGO DE Ed. (MPa)	Valor típico de Ed. (Mpa)
Mezcla asfáltica con la metodología Marshall, asfalto Convencional	2000-4000	3000
Mezcla asfáltica de alto desempeño, metodología Superpave, Protocolo AMAAC, asfalto modificado	4000-6000	5000
Mezcla asfáltica de alto módulo, metodología especial	8000-12000	10000

Tabla 2.18: Valores típicos de módulos dinámicos, a 20° C

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez

NIVEL TRÁNSITO EN EJES EQUIVALENTES	ESPESOR MINIMO DE CARPETA ASFALTICA EN CM
10,000	5.0
100,000	5.0
1,000,000	7.5
10,000,000	10.0
Mayor de 10,000,000	13.0

*Tabla 2.19: Valores mínimos recomendados, para espesores en función de ESAL's.
Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez*

2.3.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA

El efecto climático es sin lugar a duda un factor que puede tener una gran influencia en el buen desempeño del pavimento, el Instituto del Asfalto, propone la siguiente tabla para relacionar los datos de la temperatura, con la mezcla asfáltica.

Los módulos de las capas de un pavimento no son constantes, estos varían de acuerdo a efectos climáticos, de temperatura y humedad.

CLIMA	TEMPERATURA	GRADOS DEL ASFALTO
Frio	Menor o igual a 7° C	AC-5, AC-10
Templado	Entre 7 y 24 ° C	AC-10, AC-20
Caliente	Mayor de 24 ° C	AC-20, AC-40

*Tabla 2.20: Grados del asfalto de acuerdo al tipo de clima.
Efectos de la temperatura en el grado de la mezcla asfáltica.
Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez.*

2.3.6 MODELOS DE DETERIOROS

En los modelos de deterioro se tienen fundamentalmente el análisis por fatiga y el análisis por la deformación permanente, para los cuales el IMT (Instituto Mexicano del Transporte) ha generado sus modelo, en el cual ha calibrado los coeficientes que relacionan el modelo matemático con datos obtenidos en campo y en laboratorio, sin embargo, también se tiene la opción de personalizar el modelo mediante la introducción de los propios factores.

2.3.6.1 FATIGA

El número de repeticiones admisibles por fatiga depende de los niveles de deformación unitaria de tensión máxima, la expresión matemática para el modelo de fatiga será:

$$Nf = f_1 \epsilon_t^{-f_2}$$

(Ecuación 2.32)

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Dominguez

La resistencia a la fatiga se mejora por aspectos de calidad de la misma mezcla asfáltica.

2.3.6.2 DEFORMACIÓN PERMANENTE

Las deformaciones permanentes se originan por la compresión y consolidación del material ante la acción de los esfuerzos normales y cortantes, transmitidos por el flujo vehicular, para ello la ecuación para el modelo de deformación permanente es la siguiente:

$$Nd = f_3 \epsilon_c^{-f_4}$$

(Ecuación 2.33)

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Dominguez

El Instituto Mexicano del Transporte propone valores para los coeficientes y parámetros de esfuerzos y deformaciones, esto en base a su experiencia y análisis de otros modelos similares, en el IMT-PAVE el cálculo de esfuerzos y deformaciones se realizó con el método de Odemark, definido en 1949, el cual permite transformar la estructura de un pavimento en una sección homogénea equivalente. Los resultados son muy similares a los proporcionados por los programas de cómputo existentes basados en la Teoría de Burmister, dicha teoría ha sido usada ampliamente para la modelación de pavimentos flexibles.

2.3.7 ESPECTROS DE DAÑO

Para poder obtener los espectros de daño, se necesita el concepto de daño el cual fue definido por Miner, 1945, en donde para cada tipo de eje, i , y cada nivel de carga, j , se obtiene el cociente entre el número de repeticiones correspondiente esperado por año, n , y el número de repeticiones admisibles, N , para limitar el desarrollo de un cierto tipo de deterioro. El daño total se calcula con la ecuación:

Coefficiente de daño:

$$D = \sum_i i \sum_j j \frac{n_{ij}}{N_{ij}}$$

(Ecuacion 2.34)

Fuente: Manual de Usuario IMT-PAVE 1.1, DT53, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez

D : es el coeficiente de daño, el cual está asociado a un tipo de deterioro del pavimento, el inverso del coeficiente de daño, es el tiempo T , en años en que alcanzará el número de repeticiones admisibles de ese tipo de deterioro y este tiempo se compara con el período de diseño deseado.

2.3.7.1 ESPECTROS DE RESPUESTA

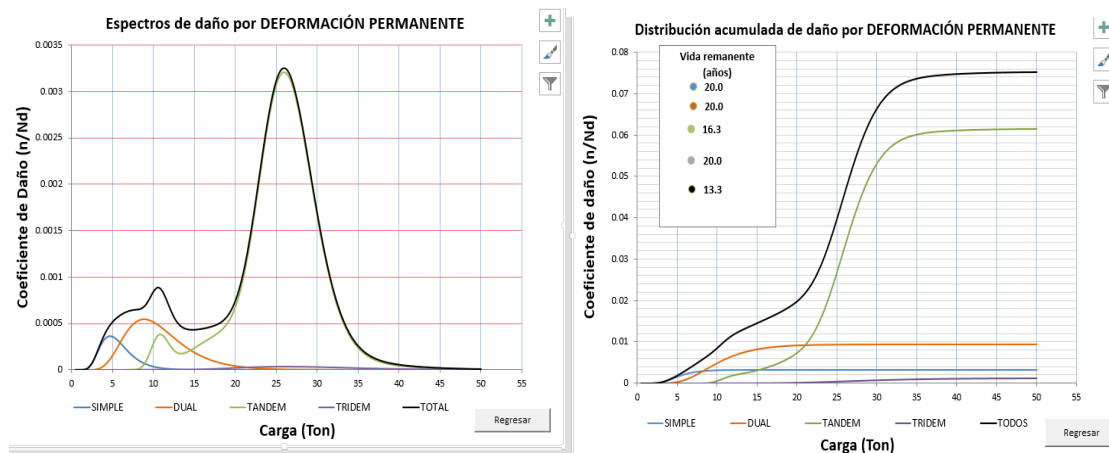


Figura 2.37: Espectros de daño por deformación permanente.

Las imágenes muestran el espectro de daño y el daño acumulado por deformación permanente, el cual es hecho para cada uno de los ejes existentes, y una combinación de todos, la vida remanente debe ser mayor que el horizonte de proyecto

2.3.7.2 ESPECTRO DAÑO-FATIGA

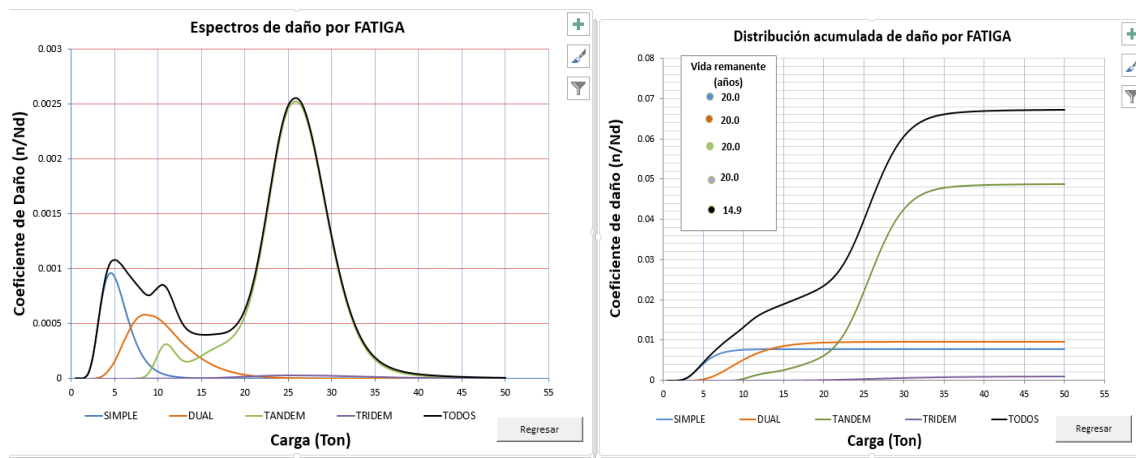


Figura 2.38: Espectros de daño por fatiga

Las imágenes muestran el espectro de daño y el daño acumulado por fatiga, el cual es hecho para cada uno de los ejes existentes, y una combinación de todos, la vida remanente debe ser mayor que el horizonte de proyecto.

2.4 ALTERNATIVA DE DISEÑO CR-ME

2.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA DEL CR-ME

CR-ME es una interfaz gráfica de cálculo que se ha generado como insumo a la nueva metodología Mecanística-Empírica de Diseño de Pavimentos que se está desarrollando en Costa Rica. Asociada a la Guía Mecanística-Empírica de Diseño de Costa Rica, ésta es una herramienta en fase de desarrollo, la cual se está llevando a cabo por las siguientes instituciones de dicho país: La Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP), el Programa de Infraestructura y Transporte (PITRA); el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LannameUCR).

La UMP-PITRA, ha generado una serie de herramientas de cálculo de este tipo, con el objetivo de proveer a los ingenieros de pavimentos, alternativas que puedan representar de manera cercana, las condiciones propias de la región, en cuanto a parámetros mecanicistas-empíricos y con ello la generación de diseños más apropiados.

Por estar a cargo de instituciones gubernamentales, el CR-ME igual que el IMT-PAVE, es una herramienta informática de acceso libre, por lo que puede ser obtenida en sus sitios web oficiales.

2.4.2 VARIABLES QUE AFECTAN EL DISEÑO.

2.4.2.1 CLIMA

Los efectos del clima interfieren significativamente en el diseño de pavimentos tanto rígidos como flexibles. En Costa Rica factores como la temperatura y la precipitación (que finalmente se traduce como humedad del suelo) causan el deterioro de las estructuras de este tipo.

En general, una división podría darse así: el factor de temperatura afecta directamente a las capas de rodamiento, y el factor de humedad afecta directamente a las capas inferiores conformadas de suelo como material de construcción. No obstante el daño en capas inferiores

genera daño de la superficie de rodamiento, de ahí que un problema de humedad también está asociado directamente con problemas a la superficie, aunque técnicamente no se involucre en el diseño de la carpeta de rodamiento.

Los principales daños en la estructura de pavimento producto de las condiciones del clima son distintos en pavimentos rígidos y flexibles.

Dentro de los principales daños que ocasiona el clima en los pavimentos flexibles están los siguientes:

- El agrietamiento en las carpetas de rodamiento: Este es producto de los cambios drásticos de temperatura cuando la capa se enfría más de lo que soporta el ligante, o de la pérdida de capacidad estructural por humedecimiento de las capas inferiores. En el primer caso se da la grieta transversal, sin embargo este no se ve en el país, pues los valores de temperatura que se debe transversal (perpendicular a la dirección del tránsito), diagonal (se dan en las esquinas de la losa normalmente).
- Asentamiento: Se da cuando entre una losa y otra se tienen diferentes condiciones de medio soportante, producto de la humedad o la erosión. Es claro que se debe tener una adecuada transferencia de carga entre las losas para que no se de esta condición.
- Desprendimiento de bloques de concreto: Esta condición se da cuando la presión que ejercen las losas es tal que no pueden resistir más se dobla a lo largo, provocando una grieta transversal que desprende parte del concreto con lo cual se libera presión. Esta última se origina producto de las elevadas temperaturas y la falta de juntas de construcción.

El factor climático afecta de forma directa el comportamiento y el rendimiento de las estructuras de pavimentos.

Ante estos problemas, en los diseños se deben considerar varios factores del clima para poder tener éxito en los proyectos. El mantenimiento preventivo (y no correctivo como se realiza en muchos países) permite solucionar daños en las estructuras que generan las variables del clima. La lluvia o la temperatura, desde una perspectiva ingenieril, no son adversas en ningún lugar, pues esas son las condiciones naturales que se deben prever y el especialista es el encargado

de determinar cuáles son los parámetros de la localidad en donde se va a desarrollar el proyecto y darles el adecuado proceso de análisis.

2.4.2.2 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

2.4.2.2.1 CAPA DE RODADURA

La capa de rodamiento debe soportar las cargas directas y concentradas a través de los neumáticos de los vehículos, por lo cual debe ser resistente. Debe soportar las condiciones climáticas por lo que debe ser durable ante los cambios térmicos y los fenómenos que generen en los materiales, debe ser impermeable para evitar la introducción de humedad en las capas, la cual genera su deterioro químico a largo plazo y pérdida de resistencia en las capas inferiores. Y debe ser segura, por lo que no es posible que permita deslizamientos y por consiguiente accidentes.

Capa base

Constituye el principal elemento estructural de la estructura del pavimento, debiendo repartir y absorber prácticamente la totalidad de las cargas verticales. La capa base desarrolla, por tanto, una función eminentemente resistente, debiendo ser además compacta y duradera para que sus características mecánicas sean lo más homogéneas posibles durante todo el periodo de proyecto.

Existen diferentes combinaciones de materiales para bases:

- Bases granulares: Formadas por materiales granulares.
- Bases granulares estabilizadas: Al material pétreo se le añade una sustancia aglomerante para mejorar sus cualidades resistentes y aumentar su rigidez.
- Bases bituminosas: Compuestas a base de mezclas bituminosas en caliente o en frío, con dosificaciones más pobres que las empleadas en las capas que conforman pavimento.

Capa sub-base

Se trata de un material de peor calidad que una base granular, dado que no tiene que resistir cargas excesivas del tráfico, se limita a proporcionar una buena capa de asiento a la base, de forma que se facilite su puesta en obra y compactación.

En cambio, sí que posee una importante función drenante, alejando el agua de las capas superiores del pavimento, para lo cual es imprescindible que los materiales empleados carezcan de finos de origen arcilloso, dado su carácter impermeable. Además, debe de hallarse en contacto con el sistema de drenaje de la vía, para evacuar el agua infiltrada en su interior. En cuanto a los materiales que conforman esta capa, deben poseer una buena granulometría, escasa plasticidad y suficiente dureza para asegurar su durabilidad.

Sub-rasante

La sub-rasante corresponde al suelo existente anterior a la construcción de la vía, por la calidad presente puede ser reemplazado completamente o sometido a métodos de mejoramiento tales como:

- Estabilización con cemento hidráulico.
- Estabilización con asfalto.
- Estabilización con cal.
- Geo-textiles.

2.4.2.3.1.1 MODULO RESILIENTE.

Es bien sabido que la gran mayoría de los materiales constituyentes de los pavimentos no son elásticos, por lo que experimentan alguna deformación posterior a la aplicación de cada. Si la aplicación de la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite una gran cantidad de veces, la deformación bajo cada aplicación es recuperable y puede considerarse elástica. (Huang, 2004) la figura siguiente muestra la deformación de un espécimen bajo una prueba de carga repetitiva.

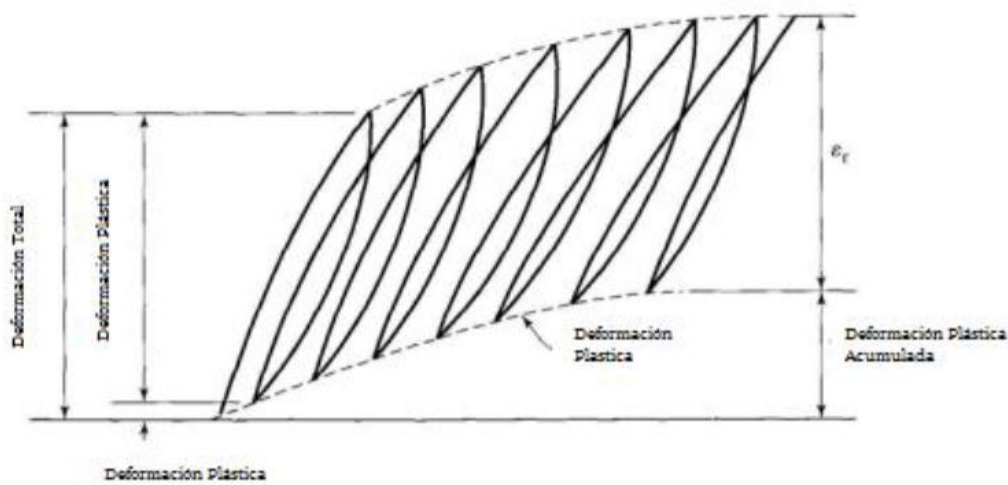


Figura 2.39: Prueba de Cargas Repetitivas Fuente. (Huang, 2004)

En la etapa inicial de las aplicaciones de carga, existe una deformación permanente considerable. Conforme el número de repeticiones se incrementa, la deformación plástica debido a cada repetición se reduce. Después de 100 o 2000 repeticiones, la deformación es prácticamente recuperable, como se indica por en la figura. (Huang, 2004) El módulo elástico basado en la deformación recuperable bajo cargas repetidas es conocido como módulo resiliente, M_r , definido como:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

(Ecuacion 2.35)

Dónde:

σ_d = Esfuerzo desviador (esfuerzo axial).

ε_r = Deformación unitaria En la prueba de compresión inconfiada o el esfuerzo axial sobrante de la presión de confinamiento en una prueba de compresión axial.

Debido a que la carga aplicada es usualmente pequeña, la prueba de módulo resiliente no es destructiva y la misma muestra puede ser usada para muchas otras pruebas bajo diferentes las condiciones de carga y condiciones ambientales.

2.4.3 VARIABLES DE ENTRADA

A continuación se presenta un diagrama (figura 2.40) representativo del funcionamiento del programa.

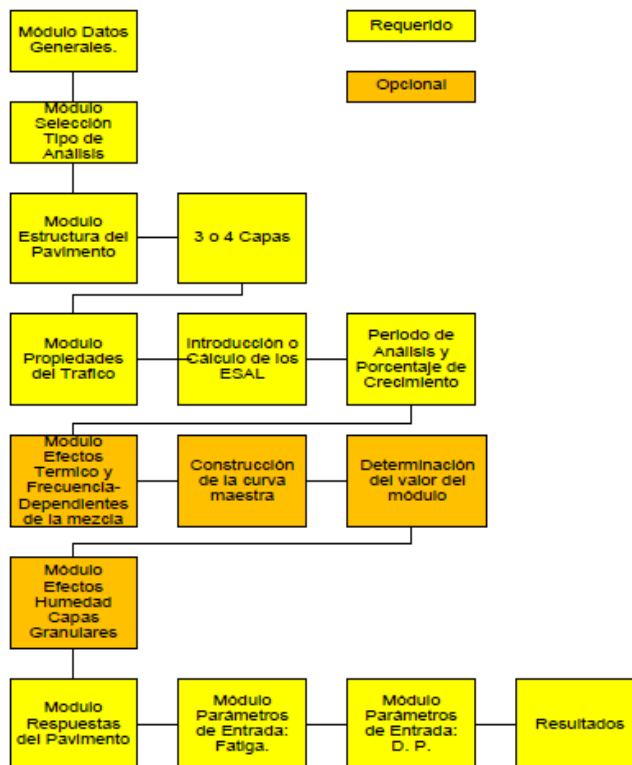


Figura 2.40-Diagrama del funcionamiento del programa

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Esta ventana representa el centro de actividades del software. Es acá donde se tiene acceso a los diversos módulos de análisis e introducción de la información, a continuación se muestra una captura de la ventana.



Figura 2.41: Pantalla inicial

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Módulo de Datos Generales/Características del Proyecto.
2. Módulo de tipo de análisis.
3. Módulo de estructura del pavimento.
4. Módulo de clima.
5. Módulo de propiedades del tráfico.
6. Módulo de efectos de temperatura en la mezcla asfáltica/curva maestra.
7. Módulo de efectos de la humedad en las capas granulares.
8. Módulo de respuestas del pavimento.
9. Módulo de parámetros de entrada: Desempeño a la fatiga.
10. Módulo de parámetros de entrada: Desempeño a la deformación permanente.
11. Botón para realizar análisis de desempeño.
12. Botón para abrir la ventana resumen de los resultados del análisis de desempeño a la fatiga.

13. Botón para abrir la ventana resumen de los resultados del análisis de desempeño a la fatiga.

14. Botón para la creación de un archivo resumen de Microsoft Excel (formato XLS).

2.4.3.1 DESCRIPCIONES GENERALES DEL PROYECTO.

Este módulo presenta una única ventana de introducción de datos. Se trata de la recolección de la información que identifique el ejercicio a realizar, al picar el botón ubicado en la portada se abre la ventana de introducción de datos. Debe notarse que al iniciar el análisis este es el único módulo que puede ser utilizado. A continuación se muestra una captura.

Figura 2.42: Pantalla de introducción de datos generales

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Nombre del proyecto: Se debe introducir el nombre del proyecto o ejemplo a ejecutar.
2. Localización: Nombre de la ruta/localización geográfica donde se encuentra el tramo que se está analizando.
3. Ingeniero en sitio: Nombre del ingeniero en sitio.
4. Encargado de diseño: Nombre del ingeniero encargado del proceso de diseño.
5. Analista: Nombre de la persona empleando esta herramienta.

6. Fecha: Fecha en que se realiza el análisis.

Descripción del funcionamiento:

Esta ventana tiene como principal función recolectar los datos de identificación del proyecto analizado y los encargados del análisis. Los campos indicados deben llenarse con información verídica y precisa.

2.4.3.2 TIPO DE ANÁLISIS.

Posteriormente a la introducción de los datos (para fines del uso del software, pueden dejarse sin datos), el botón correspondiente al siguiente módulo, Tipo de Análisis, se vuelve disponible en la Portada. Cuando se pica dicho botón la siguiente ventana se abre:

Figura 2.43: Pantalla de elección de tipo de análisis

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Lista que contiene los diversos modos en que se puede tomar en cuenta los parámetros climáticos en el análisis, contiene las siguientes opciones:
 - Análisis climático (No se toma en cuenta el análisis climático).
 - Calculo de perfiles climáticos a partir de registro anual. (Se toma en cuenta la variación estacional de la temperatura, generando perfiles climáticos con comportamientos de temperatura similares).

2. Lista que contiene los diversos modos en que se puede tomar en cuenta las características térmicas y frecuencia-dependientes de la mezcla asfáltica en el análisis, contiene las siguientes opciones:
 - Valor único introducido por el usuario (No se toma en cuenta dicha variabilidad).
 - Valor único calculado a partir del ensayo de módulo dinámico (Se toma en cuenta la variabilidad del módulo de la mezcla con respecto a una temperatura del aire única, introducida más adelante).
 - Valor(es) calculado(s) a partir del ensayo de módulo dinámico y de acuerdo a parámetros climáticos. (Se toma en cuenta la variabilidad del módulo de la mezcla con respecto a una cantidad de temperaturas igual a la cantidad de perfiles climáticos que el usuario define. La temperatura es calculada automáticamente a partir de dichos datos de temperatura).

3. Lista que contiene los diversos modos en que se puede tomar en cuenta la influencia de la humedad en las capas granulares en el análisis, contiene las siguientes opciones:
 - Valor introducido por el usuario y único por capa (No se toma en cuenta la humedad en las capas granulares)
 - Valores introducidos por el usuario y dependientes del perfil climático para cada capa- Introducción Directa de Saturación.

En el módulo de efectos de temperatura en la mezcla asfáltica/curva maestra, se introducen los datos del ensayo del módulo dinámico AASHTO PP 61-10 (si así lo indica el usuario) y de acuerdo a los datos introducidos en el módulo de clima, se calcula de acuerdo a una temperatura introducida directamente, o a partir de las temperaturas obtenidas de los datos climáticos.

En el módulo de propiedades de las capas granulares se introducen los valores de saturación para cada una de las capas en cada uno de los perfiles climáticos escogidos.

2.4.3.2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

Posterior a la selección del tipo de análisis, es necesario introducir los datos propios de la estructura. Cuando se ha completado el segundo módulo es posible picar el botón correspondiente a este, generando la aparición de la siguiente ventana:

Figura 2.44: Pantalla de elección de la cantidad de capas.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Lista que contiene la cantidad de capas de la estructura a analizar, para este estudio solamente existe la opción de realizar análisis para 2 configuraciones de estructura:
 - 3 capas: Carpeta, Base, Sub-rasante.
 - 4 capas: Carpeta, Base, Sub-base, Sub-rasante.
2. Lista que contiene el tipo de vía a utilizar, contiene las siguientes opciones basadas en la clasificación propuesta por la guía AASHTO 93:
 - Interestatal (Rutas Nacionales)
 - Rutas Primarias.
 - Otras (Rutas rurales)
3. Cierra la ventana.
4. Guarda los datos y continúa con la siguiente ventana.

Posteriormente a la selección del tipo de estructura, se procede a introducir los datos característicos de esta, dependiendo del número de capas al presionar el botón aceptar se abren las siguientes ventanas. Se tiene para 3 capas:

Figura 2.45: Pantalla de elección de espesores para 3 capas

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Profundidad hasta el estrato rocoso/ profundidad donde se puede considerar no existe influencia de la carga aplicada. Si no se conoce se puede asumir 60 pulgadas.
2. Espesor carpeta asfáltica.
3. Espesor Base.
4. Módulo resiliente carpeta asfáltica.
5. Módulo resiliente base granular.
6. Módulo resiliente sub-rasante.
7. Razón de Poisson carpeta asfáltica.
8. Razón de Poisson base granular.
9. Razón de Poisson sub-rasante.
10. Botón para salir de la ventana.
11. Botón para completar la ventana.

Para una configuración de 4 capas se tiene:

Figura 2.46: Pantalla de elección de espesores para 4 capas
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Profundidad hasta el estrato rocoso/ profundidad donde se puede considerar no existe influencia de la carga aplicada. Si no se conoce se puede asumir 60 pulgadas.
2. Espesor carpeta asfáltica.
3. Espesor Base.
4. Espesor Sub-Base.
5. Módulo resiliente carpeta asfáltica.
6. Módulo resiliente base granular.
7. Módulo resiliente sub-base granular.
8. Módulo resiliente sub-rasante.
9. Razón de Poisson carpeta asfáltica.
10. Razón de Poisson base granular.
11. Razón de Poisson sub-base granular.
12. Razón de Poisson sub-rasante.
13. Botón para salir de la ventana.
14. Botón para completar la ventana.

Descripción del funcionamiento:

Para la determinación de los espesores a utilizar se pretende que el usuario utilice la herramienta para analizar estructuras propias de interés, sin embargo si el usuario no cuenta con esa información o desea realizar un diseño con la metodología de la guía AASHTO 93, en la barra de menús se incluye una interfaz de cálculo de espesores.

2.4.3.3 CALCULO DE ESPESORES METODOLOGÍA AASHTO 93.

Cuando el usuario pica en el menú ubicado en la parte superior de la Portada, la siguiente interfaz de cálculo aparece la siguiente figura:

Capa	Modulo Resiliente (psi)	Coeficiente Estructural	Espesor (pulg)
Carpetas		5	8
Beso	2	6	9
Subbase	3	7	10
Subrasante	4		

Figura 2.47: Pantalla para determinar espesores según AASHTO 93

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Lista que contiene la cantidad de capas a utilizar (Nuevamente, 3 o 4 capas).
2. Módulo resiliente de la base.
3. Módulo resiliente de la sub-base.
4. Módulo resiliente de la sub-rasante.

5. Coeficiente estructural de la carpeta asfáltica.
 6. Coeficiente estructural de la base granular.
 7. Coeficiente estructural de la sub-base granular.
 8. Espesor calculado de la carpeta (Aparece luego de picar el botón 15, teniendo toda la información de entrada).
 9. Espesor calculado de la base (Aparece luego de picar el botón 15, teniendo toda la información de entrada).
 10. Espesor calculado de la sub-base (Aparece luego de picar el botón 15, teniendo toda la información de entrada).
 11. Cambio de serviciabilidad esperado en el periodo de análisis.
 12. ESAL's o Ejes equivalentes de 18 000 libras de diseño.
 13. Lista que contiene diversos porcentajes de confianza con su respectivo valor de la variable estadística Z.
 14. Desviación estándar. (Si no se conoce el valor puede utilizarse 0.5 como valor para Costa Rica).
 15. Botón para realizar cálculo de espesores.
- Cuando el usuario pasa de considerar 3 o cuatro capas, los ítems de introducción de datos cambian de la misma forma.

Descripción del funcionamiento:

El usuario debe introducir la totalidad de los datos indicados en la figura para que de acuerdo a la ecuación 6, al picar el botón denominado "Calcular", indicado con el número 15, los campos de texto no editable 7, 8 y 9 muestren los espesores.

2.4.3.4 MÓDULO DE CLIMA

Posterior a la finalización del módulo de introducción de los datos de la estructura, el módulo de caracterización del clima se vuelve disponible. Dependiendo de la modalidad escogida en el

módulo Tipo de Análisis, el resultado de picar en el botón puede variar. Si se ha decidido no tomar en cuenta el clima, la siguiente ventana se abre:

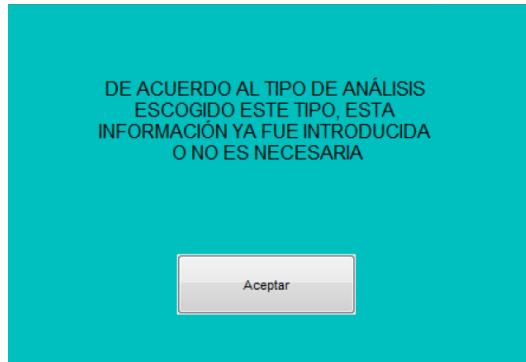


Figura 2.48: Pantalla cuando no se toma el clima.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Se debe picar en el botón “Aceptar” y el siguiente módulo se vuelve disponible, sin embargo, si el usuario escogió tomar en cuenta las características del clima en su análisis, la siguiente ventana se abre en su lugar:

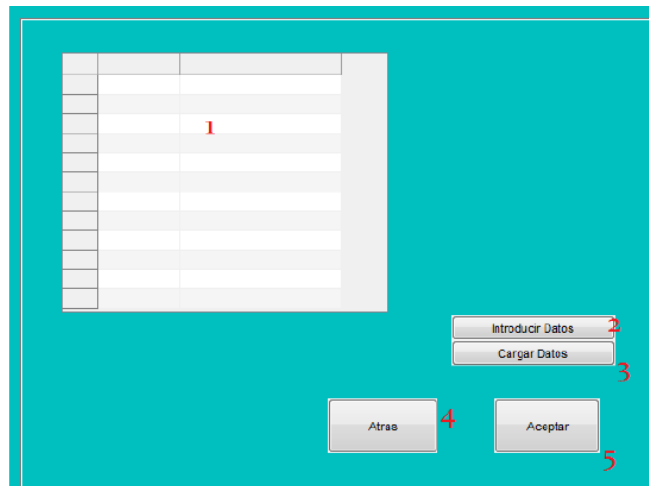


Figura 2.49: Pantalla para ingreso de datos del clima.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Cuadro de datos de información del clima, debe llenarse con la información de temperatura media diaria para todos los días del año. Para esto se debe inicialmente introducir los datos en el botón siguiente.
2. Introducir datos: Abre el archivo de Excel destinado para introducir los datos de clima, en el anexo 5 se muestran capturas de este archivo. Posteriormente a la introducción de los datos se pica el botón siguiente.
3. Cargar datos: Al picar este botón se importan los datos introducidos en el archivo de Excel para ser introducidos en la memoria propia del programa. Al presionar este botón los datos se vuelven visibles en el cuadro 1.
4. Sale de la ventana.
5. Sale de la ventana para continuar con la siguiente.

Cuando se termina de introducir datos en la ventana anterior y se presiona el botón “Aceptar”, se presenta una ventana cuyo objetivo es por medio de la metodología estadística de las diferencias medias determinar perfiles climáticos.

La forma de determinar dichos perfiles consiste en delimitar periodos dentro del año que cuenten con pendiente nula o similar, a continuación se muestra una captura de la ventana:

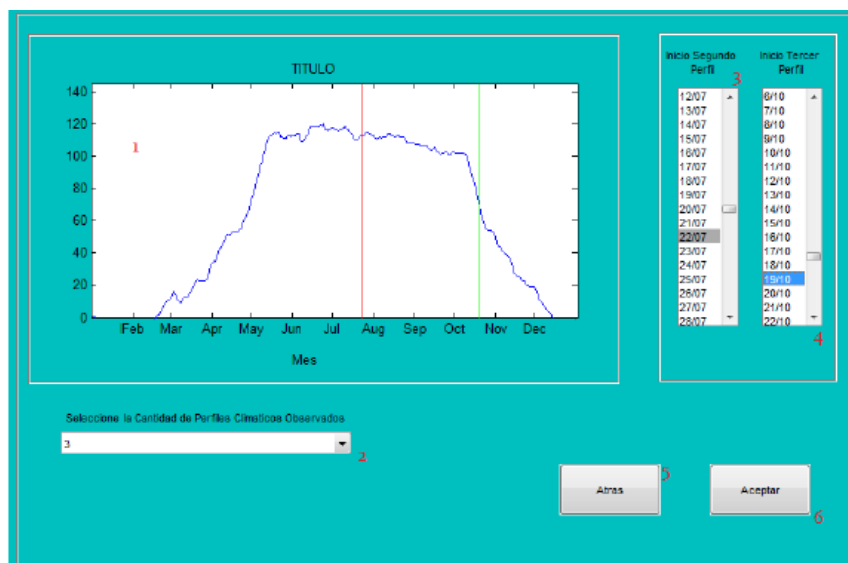


Figura 2.50: Pantalla de perfiles climáticos.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Representación de las diferencias medias de temperatura a partir de los datos introducidos en la ventana anterior.
2. Lista que contiene el número de perfiles que el usuario considera existen según lo mostrado en 1. De acuerdo a la figura anterior existen 3 perfiles, un perfil al inicio del año con pendiente creciente, un perfil al segundo tercio del año con una pendiente relativamente constante y un perfil al final del año con una pendiente decreciente.
3. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del primer perfil.
4. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del segundo perfil.
5. Sale de la ventana.
6. Sale de la ventana y guarda los datos.

2.4.3.5 MÓDULO DEL TRÁFICO

Posterior a la finalización del módulo de clima, el módulo de tráfico se vuelve disponible, este módulo tiene la función de recolectar la información relacionada con la cantidad y características de los vehículos que transitan el proyecto en cuestión, cuando se pica el botón correspondiente la siguiente ventana aparece:

Figura 2.51: Pantalla de datos generales del tránsito.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Se debe introducir la velocidad promedio en millas por hora de los vehículos que transitan la carretera en el proyecto en cuestión.
2. Lista que contiene la representación de la forma del pulso de carga que aplican los vehículos en un punto específico, si la carpeta cuenta con más de 15 cm se trata de un pulso triangular, si cuenta con menos, se trata de un pulso sinusoidal.
3. Se debe introducir la presión de inflado en psi.
4. Botón que al picarse presenta la siguiente ventana, cuyo objetivo es introducir los ejes equivalentes de diseño:
5. Sale de la ventana.
6. Sale de la ventana después de haber incluido todos los datos (incluyendo botón 4).

*Figura 2.54: Pantalla de opciones para la introducción de datos de tránsito.
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.*

Descripción de interfaz:

1 y 2. Seleccionador exclusivo (no se pueden seleccionar los dos) que permite escoger la forma en la que se introducen los datos de tráfico. Si se escogió introducir directamente (marcado con el número 1) se presentan la interfaz anterior, con los siguientes elementos:

3. Introducción directa de los ejes equivalentes de 18 000 que se estima pasarán por la vía en cuestión en el periodo de diseño.

4. Periodo de análisis.

5. Porcentaje de crecimiento anual del tráfico.

6. Sale de la ventana.

7. Sale de la ventana y guarda los datos.

Si el usuario en lugar de escoger la introducción directa del ESAL's, escoge su cálculo al no conocer el valor, la ventana cambia a esta forma:

*Figura 2.53: Pantalla para la opción de introducción de los datos de tránsito.
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.*

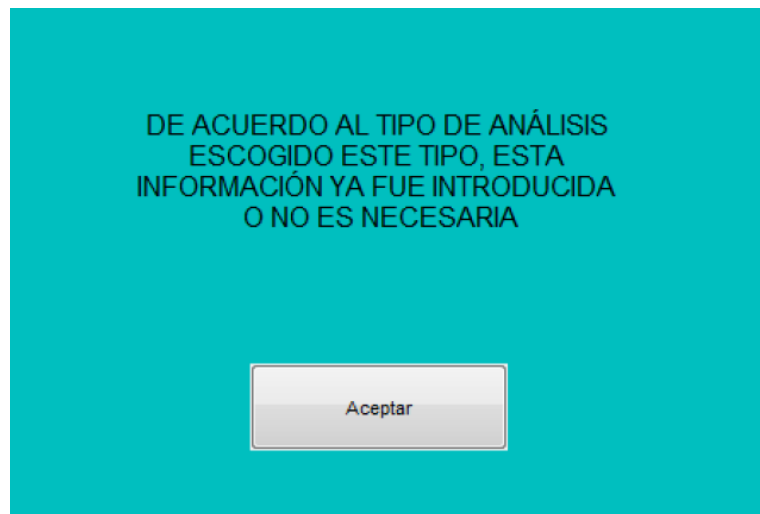
4. Factor direccional (Porcentaje de vehículos del TPDA que viajan en la dirección con mayor tráfico). Si no se conoce se asume igualdad; $DS=0.5$.
5. Factor de línea: si existen varios carriles por dirección, este valor corresponde al porcentaje del tráfico del mayor carril, valor decimal. Si no se conoce $LDF=1$.
6. Calcula los ejes equivalentes de diseño.
7. Cuadro donde manualmente, para cada fila, se requiere:
 - Columna 1 (Tipo de Vehículo): Descripción del tipo de vehículo.
 - Columna 2 (% Volumen): Porcentaje del TPDA correspondiente a ese tipo de vehículo.
 - Columna 3 (Factor Camión): Proporción entre el impacto que tiene el tipo de vehículo y el vehículo equivalente, en caso de no conocer presionar 8 para obtener los valores para Costa Rica.
8. Abre la ventana de factores camión de Costa Rica.
9. Sale de la ventana.
10. Sale de la ventana y guarda los datos, requiere haber calculado el ESAL's y obtenido un valor numérico al presionar 6.

Dependiendo de los parámetros del usuario, el cálculo de los ejes equivalentes de 18 000 libras se puede realizar en 1 o 2 ventanas, sin embargo se debe respetar el principio de programación que indica que cada ventana debe ser alimentada con valores correctos de acuerdo con lo que el usuario desee. Al ir alimentando y cerrando las ventanas se concluye el módulo de tráfico, para posteriormente habilitar el módulo de efectos de temperatura en la mezcla asfáltica/curva maestra.

La introducción de la velocidad corresponde a la necesidad del cálculo de la frecuencia si se escoge calcular la curva maestra, es por eso que la velocidad solo aparecerá para ser introducida si en el módulo de selección del tipo de análisis se indica el cálculo de dicha curva. Para calcular la frecuencia se usa el gráfico 4 el cual fue digitalizado y está incluido dentro del código.

2.4.3.6 MÓDULO DE EFECTOS DE TEMPERATURA EN LA MEZCLA ASFÁLTICA/CURVA MAESTRA.

Cuando se presiona el botón correspondiente, de la misma forma que con el módulo de tráfico, dependiendo del tipo de análisis establecido por el usuario existen varias ventanas que pueden aparecer, si no se decide considerar los efectos térmicos y frecuencia-dependientes de la mezcla asfáltica, la siguiente ventana aparece:



*Figura 2.55: Pantalla de cuando no se tomaran efectos térmicos.
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.*

Se debe presionar en el botón “Aceptar” y el siguiente módulo se vuelve disponible, sin embargo, si el usuario escogió tomar en cuenta las características térmicas y frecuencia dependiente de la mezcla asfáltica, pero no introdujo los efectos del clima, en la figura 2.56 aparece:




Figura 2.56: Pantalla cuando se tomaran en cuenta los efectos térmicos.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de la interfaz:

1. Se introduce la temperatura media del aire en el proyecto en cuestión.
2. Se sale de la figura.
3. Se sale de la figura y se guardan los datos.

Si el usuario decidió introducir los datos del clima como se indicó anteriormente, la ventana anterior no se muestra, ya que los valores de temperatura ya están calculados desde su introducción en el módulo de clima. Si se da este caso, o luego de introducir directamente la temperatura, se hacen necesarios los datos del ensayo del módulo dinámico AASHTO P 61-10, empezando por la ventana presentada a continuación, esta ventana fue desarrollada por la Ing. Paulina Leiva y acoplada para este proyecto. (Leiva, 2013, Por Publicar).



DATOS DE ENTRADA

Ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias

	Temperatura (F)	Frecuencia (Hz)	Módulo(ksi)	Ángulo de fase (°)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7			1	
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

4

 5

Datos de volumetría del modelo (Hirsh)

VMA 2

VFA 3

6

Figura 2.57: pantalla de introducción valores de carpeta.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una guía de diseño de pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de la interfaz:

1. Cuadro de valores correspondientes al ensayo del módulo dinámico.
2. Introducción del valor del parámetro VMA (Voids in the Mineral Aggregate, por sus siglas en inglés) o vacíos en el agregado mineral. Si no se conoce se puede asumir un valor estándar de 15%.
3. Introducción del valor del parámetro VFA (Voids Filled with Asphalt, por sus siglas en inglés) o vacíos llenos con asfalto. Si no se conoce se puede asumir un valor estándar de 70%.
4. Antes de poder presentar los resultados en el cuadro indicada por 1 en esta ventana, es necesario introducirlos en un archivo de Excel, al picar en este botón se abre dicho archivo para su edición y posterior guardado. Detalles del archivo se encuentran en tablas.

5. Posterior a la inclusión de los datos del ensayo en cuestión, este botón permite la importación para el uso de MATLAB, y su muestra en el cuadro 1.
6. Luego de haber importado los datos y tener los valores de VMA y VFA, este botón permite calcular la curva maestra de la mezcla asfáltica. Cierra la ventana.

Posterior a la finalización de la ventana anterior, se presentan una serie de ventanas de verificación, estas ventanas nos indican la calidad de los datos y por consiguiente la calidad de la curva generada.

El resultado final corresponde al presentado por la siguiente ventana, Esta ventana fue desarrollada por la Ing. Paulina Leiva y acoplada para este proyecto (Leiva, 2013, Por Publicar):

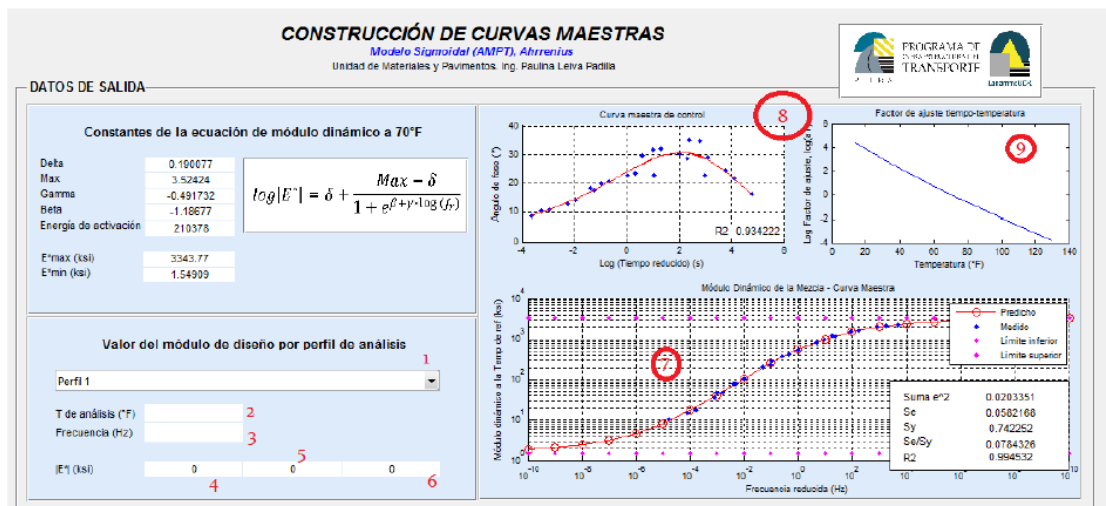


Figura 2.58: Curva maestra.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

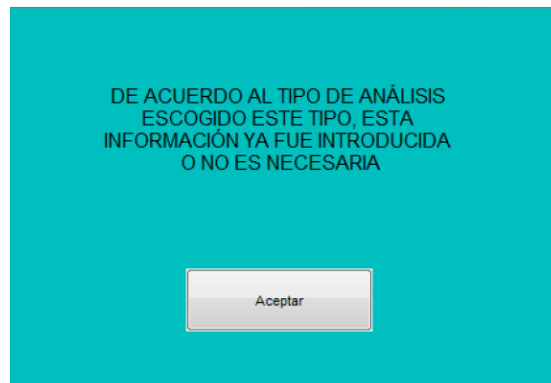
Descripción de la interfaz:

1. Lista que permite calcular el módulo para cada uno de los perfiles climáticos escogidos. En caso de que no se haya decidido tomar en cuenta el clima, solamente será válido escoger el perfil 1, el cual corresponde a la temperatura introducida a inicios del módulo.

Cada vez que se seleccione cada uno de los perfiles climáticos, la temperatura de análisis y la frecuencia utilizadas para su cálculo, se indican en 2 y 3 respectivamente. El módulo resultante para el perfil 1, perfil 2 y perfil 3 serán colocados en 4, 5 y 6. Si un perfil no ha sido definido y se selecciona en la lista, una advertencia indicara que dicho perfil no aplica.

2.4.3.7 MODULO DE EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LAS CAPAS GRANULARES.

Cuando este módulo ha sido completado, el correspondiente al análisis de la saturación presente en las capas granulares se vuelve disponible. Dependiendo de lo indicado en el módulo Tipo de Análisis, aparecerán diferentes ventanas al picar el botón correspondiente a este módulo. Si se ha decidido no tomar en cuenta la humedad en las capas granulares, se muestra la siguiente ventana.



*Figura 2.59: Pantalla cuando no se toma en cuenta las capas granulares.
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.*

Se debe picar en el botón “Aceptar” y el siguiente módulo se vuelve disponible, sin embargo, si el usuario escogió tomar en cuenta la humedad en las capas granulares (debido a como está construido el módulo tipo de análisis, para poder seleccionar esta opción, es necesario tomar en cuenta el clima), la siguiente figura aparece:

Por favor introduzca los valores que según su criterio ingenieril corresponden a la saturación (%) de las capas granulares del pavimento y su descripción de acuerdo al tamaño de las partículas

		Saturación Óptima	Primer perfil	Segundo Perfil	Tercer Perfil
Base	- 1	4	7	10	13
Subbase	- 2	5	8	11	14
Subrasante	- 3	6	9	12	15

16

Atras 17 Aceptar

Figura 2.60: Pantalla cuando se tomaran en cuenta las humedades de las capas granulares.
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

La saturación óptima corresponde a la saturación presente en la máxima densidad, la cual corresponde a la prueba del Próctor Modificado. Las saturaciones presentes en las diversas capas, para los diversos perfiles climáticos (ejemplo la saturación del primer perfil climático del año, para la base, numerado con el 7), quedan a criterio del ingeniero. Para el cálculo de las saturaciones óptimas y de equilibrio, los siguientes cuadros, junto con la ecuación:

$$S = \frac{G_s W}{e}$$

(Ecuación 2.36)

Permiten obtener valores guía en caso de no conocer los valores precisos.

Tipo de Suelo	Contenido de Humedad Óptimo	Contenido de Humedad Equilibrado
Arena Gruesa	8-13	10-15
Arena Media	10-14	13-17
Arena Fina	12-16	15-20
Limo	14-21	20-30
Arcilla	16-30	25-35

Tabla 2.21: Humedades de materiales Fuente: (Witczak, Zapata, & Houston).

Tipo de Material	Gravedad Específica
Arena	2.65-2.67
Arena Limosa	2.67-2.7
Arcilla Inorgánica	2.7-2.8
Suelo Orgánico	1-2.6
Arena Volcánica	2.32
Kaolinita	2.61
Arcilla Aluvial	2.65
Arena de Río	2.65

Tabla 2.22: Gravedad específica de materiales Fuente: (Witczak, Zapata, & Houston).

Suelo	Relación de Vacíos
Arena Suelta	0.8
Arena Densa	0.45
Arena Suelta (angular)	0.65
Arena Densa (Angular)	0.4
Arcilla Dura	0.6
Arcilla Suave	0.9-1.4
Arcilla Orgánica Suave	2.5-3.2

Tabla 2.23: Índices de vacíos de materiales Fuente: (Witczak, Zapata, & Houston)

2.4.3.7. RESPUESTAS DEL PAVIMENTO.

Habiendo introducido los valores de los módulos resiliente y dinámico, de acuerdo a sus propiedades térmico y frecuencia-dependientes (carpeta asfáltica), o a la influencia de la humedad, se hace necesario evaluar las respuestas elásticas de la estructura para la evaluación de los modelos de desempeño.

El módulo posterior al correspondiente a la humedad de las capas granulares permite recolectar dichas respuestas. Al indicar su disponibilidad, y posteriormente picar el botón, la siguiente ventana se abre:

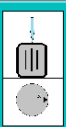
Los datos a continuación corresponden a los parámetros de entrada para la herramienta externa de análisis de multicapa elástica (ELSYM5, 3DMOVE) que usted debe realizar y cuyos parámetros de salida son necesarios para el análisis.

Por favor al finalizar el análisis, indicar los valores necesarios en la columna "Valor"

Presión de Inflado (psi)

Carga (lbs)

Radio de zona de contacto (in)



	Profundidad z (in)	x (in)	y (in)	Respuesta Buscada	Valor
1	1	0	0	0 Def. Vertical	5
2	2	0	0	0 Def. Horizontal	6
3	3	0	0	0 Def. Vertical	7
4	4	0	0	0 Def. Vertical	8

Capa	Espesor (in)	Modulo Resiliente (psi)	Razon de Poisson
Carpeta		9	13
Base		10	14
Subrasante	Semi-infinito	11	15
		12	16

NOTA: Para hacer uso del ELSYM5, es necesario contar con un sistema operativo de 32 bits. En caso de no contar con este tipo de sistema operativo, se presenta el link de descarga y un tutorial para la utilización del software 3D MOVE para nuestros propósitos.

ANALIZAR CON ELSYM5

Ver tutorial 3DMOVE

Atras

Aceptar

Figura 2.61: Pantalla de análisis de respuesta.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Esta ventana aparecerá tantas veces como perfiles se hayan definido, debido a que las propiedades de la estructura cambian con el perfil climático debido a que la temperatura variable a lo largo del año afecta la carpeta de una forma distinta y las saturaciones varían de igual forma.

Como se indicó anteriormente se requieren las respuestas en los puntos críticos, por lo cual la gran cantidad de elementos en esta ventana son de información para introducir en el programa de análisis de elemento finito o multicapa elástica escogido.

Los elementos del 1 al 4 corresponden a las profundidades de los puntos de análisis.

Los elementos del 5 al 8 corresponden a las respuestas (todas deformaciones unitarias) buscadas. Los elementos del 9 al 12 corresponden a los módulos resilientes y los elementos del 13 al 16 corresponden a las razones de Poisson de las capas, nuevamente para su introducción en el programa.

2.4.3.8. PARÁMETROS DE ENTRADA: DESEMPEÑO A LA FATIGA.

Posterior a la introducción de las respuestas elásticas, los últimos pasos para el análisis de desempeño corresponden a la introducción de parámetros faltantes en los modelos. Para este momento la gran mayoría de los parámetros necesarios han sido introducidos, tal y como se ve en la siguiente figura que corresponde a la ventana perteneciente al módulo: parámetros de entrada: Desempeño a la Fatiga.

Parametros Para la Evaluación del Comportamiento de Fatiga

Deformación Elástica: Varía de acuerdo al perfil climático 1

Modulo resiliente (psi): Varía de acuerdo al perfil climático 2

Factor de Corrección C: Calcular 3

Espesor Carpeta (in): 4

Porcentaje Crecimiento (%): 5

Periodo de Análisis (años): 6

Ejes de Diseño: 7

Modelo de fatiga: 8

$$N_f = 0.00432 * k''_1 * C \left(\frac{1}{\sigma_r} \right)^{1.9492} \left(\frac{1}{E} \right)^{1.281}$$

$$k''_1 = \frac{1}{0.000298 + \frac{0.003602}{1 + e^{(1.023497942)}}$$

$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{2.84 * \ln(10.56)}} \right) * \left(\frac{1}{60} \right)$$

$$FC = \left(\frac{1000}{1 + e^{2.84 * \ln(10.56)}} \right) * (10.56)$$

Atras 9 Aceptar 10

Figura 2.62: Pantalla para evaluación del comportamiento de fatiga.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Al generarse la ventana, si se han introducido los valores de forma correcta, automáticamente se presentan los valores representados por el 1, 2, 4, 5, 6, 7. El elemento numerado con el 8 corresponde a una lista con dos elementos:

- **MEPDG.**
- **LanammeUCR.**

Estos elementos corresponden al modelo de desempeño a la fatiga a utilizar, específicamente la cantidad de repeticiones admisibles para las condiciones mostradas. El factor de corrección C, presente solamente en la teoría de la guía MEPGD, responde a la necesidad de corregir con respecto a los vacíos en la mezcla asfáltica. Al picar en dicho botón se abre la ventana de la figura 2.63:

Figura 2.63: Pantalla del factor C.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Los parámetros de entrada 1 y 2 deben introducirse antes de picar en el botón 3. Cuando se realiza esta acción, el elemento de texto 4 mostrará el factor calculado. Si no se conoce el valor de los parámetros de entrada, se puede asumir valores de 11% y 5% para 1 y 2 respectivamente, resultando en un valor de Factor de 1.0.

Parámetros de entrada: Desempeño con Respecto a la Deformación permanente.

Al finalizar el módulo correspondiente a la fatiga, y de la misma forma, la gran mayoría de los parámetros han sido introducidos, en la figura 2.64 se muestra una captura:

Parameters for the Evaluation of the Permanent Deformation of the Asphalt Pavement

1 Elastic Response: **1**
 2 Temperature (°F): **2**
 3 Asphalt Layer Thickness (m): **3**
 4 Number of Load Repetitions: **4**
 5 Average Air Temperature (°C): **5**

Parameters for the Evaluation of the Permanent Deformation of the Subgrade

6 Elastic Deformation: **6**
 7 Depth to Stratum Rososo (m): **7**

Parameters for the Evaluation of the Permanent Deformation of the Base

8 Base Layer Thickness (m): **8**
 9 Elastic Response: **9**
 10 Freatic Level (m): **10**
 11 Number of Load Repetitions: **11**

Parameters for the Evaluation of the Permanent Deformation of the Subbase

12 Subbase Layer Thickness (m): **12**
 13 Elastic Response: **13**
 14 Number of Load Repetitions: **14**

$$PD = \sum_{i=1}^{n+1} \epsilon_p^i h_i^2$$

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_c} = k_1 = 10^{-0.131109 T^{1.2889} N^{0.1417624}}$$

$$h_i = (C_1 - C_2 * depth) * 0.328196^{depth}$$

$$C_1 = -0.1039 * H_e^2 + 2.4868 * H_{e0} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172 * H_e^2 - 1.7331 * H_{e0} - 27.428$$

$$\delta_i(x) = h_i \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c} \right)^{\frac{1}{\rho}} \left(\frac{z}{h_i} \right)^{\rho} \epsilon_c h$$

$$\log \beta = -0.61119 - 0.017638 H_e$$

$$\rho = 10^{\left[\frac{C_e}{(1 - (10^{-T})^{\beta})} \right]^2}$$

$$\log \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_c} \right) = \frac{(e^{j \log \beta} * a_1 E^{h_i}) + (e^{j \log \beta} * a_2 E^{h_i})}{2}$$

$$C_e = \ln \left[\frac{(a_1 h_i^{\beta})}{(a_2 E^{h_i})} \right]$$

$$H_e = 51.712 \left[\left(\frac{E}{2555} \right)^{-1.2388} * DWT^{1.18} \right]$$

$$\delta = \int_{z=0}^{H_{subbase}} e^{-kz} dz = \left(\frac{1 - e^{-k H_{subbase}}}{k} \right) |_{z=0}^{z=H_{subbase}}$$

15 Atras 16 Aceptar

Figura 2.64: Pantalla del análisis de fatiga.
 Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Absolutamente todos los elementos del 1 al 14 (en caso de tratarse de 3 capas los elementos 12, 13 y 14 no aplican) serán automáticamente cargados, excepto el 10 el cual corresponde al nivel freático (m).

2.4.3.8.1 MÓDULO DE RESULTADOS: FATIGA

Cuando se han introducido los datos correspondientes a todos los módulos, el botón denominado “ANALIZAR” en la portada efectuará el análisis de desempeño utilizando los datos introducidos.

Para confirmar que el análisis se está realizando se puede observar la barra de estado localizada en la esquina superior derecha cargarse. Cuando esto se realiza, la sección de resultados en la esquina inferior derecha se vuelve disponible.

El botón denominado “Fatiga” presenta un resumen corto de los resultados del análisis por fatiga. Al picarlo la siguiente ventana aparece:

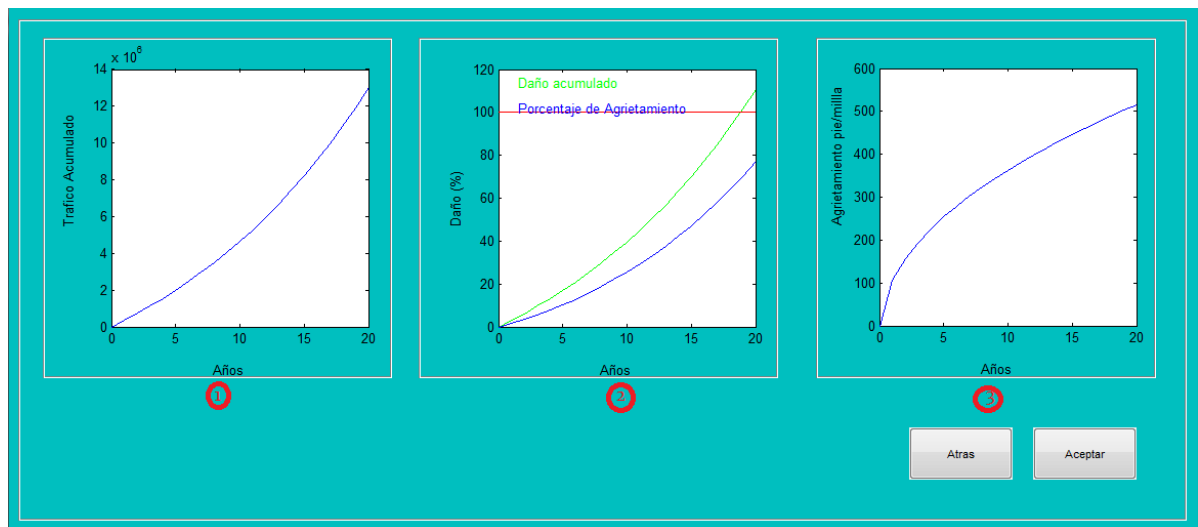


Figura 2.65: Pantalla de resultados de fatiga.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Resultados, análisis fatiga.

Descripción de la Interfaz:

1. Gráfico resumen del tráfico acumulado a lo largo del periodo de estudio. (A los 20 años es equivalente al valor de ESAL's)
2. Grafico que muestra el daño acumulado y el porcentaje de área agrietada.
3. Gráfico que muestra el área agrietada (pie/milla) a lo largo del periodo de análisis.

Descripción del funcionamiento: El gráfico denotado con el número 1 corresponde a la variación del tráfico acumulado a lo largo del periodo de análisis, es calculado a partir del porcentaje de crecimiento, el período y los ejes equivalentes totales.

2.4.3.8.2 RESULTADOS: DEFORMACIÓN PERMANENTE

De la misma forma en que se hizo visible el resumen de resultados de fatiga, el resumen de resultados correspondiente al análisis de la deformación permanente se presenta a continuación:

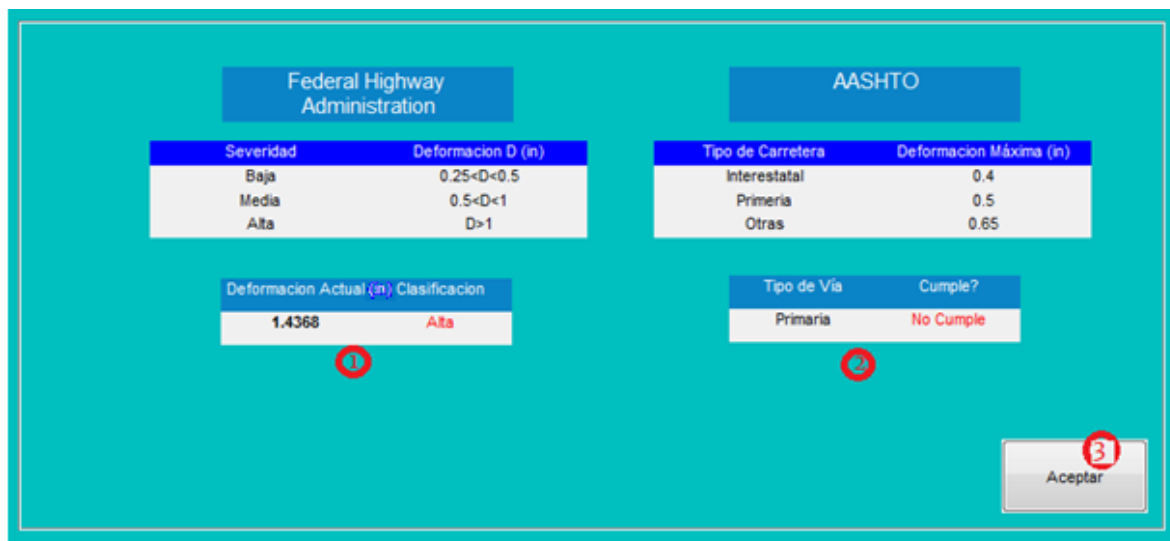


Figura 2.66: Pantalla de resultados de fatiga.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de la interfaz:

1. Clasificación de la deformación actual de acuerdo a los parámetros definidos por la Administración Federal de Carreteras de E.E. U.U. (Federal Highway Administration).
2. Clasificación de la deformación actual de acuerdo a los parámetros definidos por AASHTO de E.E. U.U.
3. Sale de la ventana.

2.4.3.8.3 RESULTADOS: RESUMEN EN MICROSOFT EXCEL.

El último botón habilitado al enviar la orden al programa de realizar el análisis de resultados es el denominado como “Ver Resumen en Archivo Excel”. Al presionar este botón el programa generará un archivo de Excel con el resumen de la totalidad de los parámetros de entrada y salida del programa. Cuando se presiona el botón, se debe escoger el nombre del archivo y la localización del archivo resumen en esta ventana:

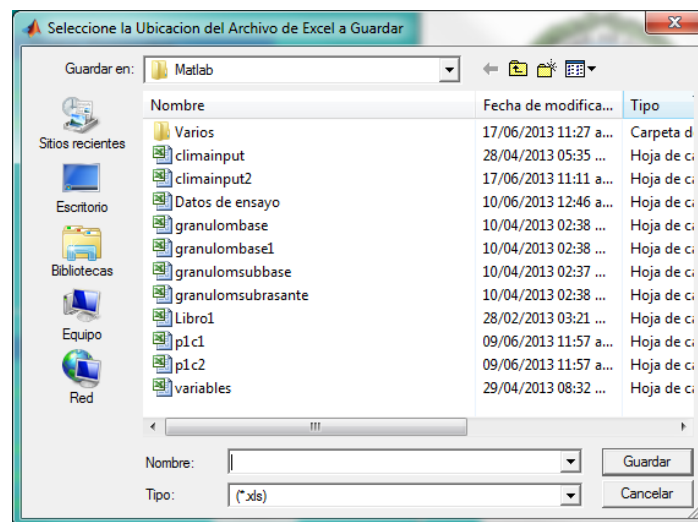


Figura 2.67: Pantalla de interfaz para guardar.

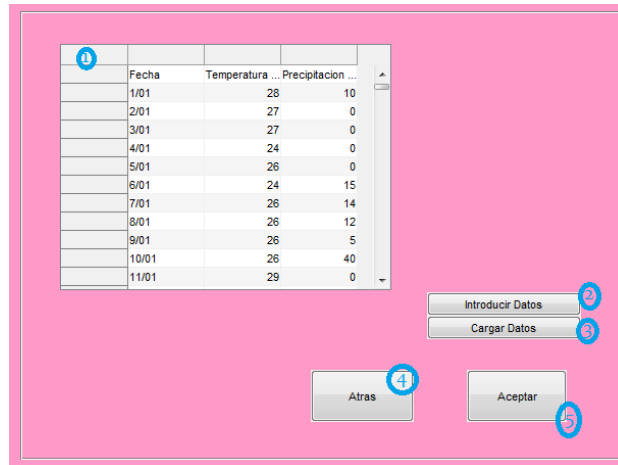
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Posteriormente a la escogencia del nombre, el programa durará aproximadamente un minuto generando el archivo resumen. Los patrones de creación de dichos resúmenes se encuentran en las tablas. En las tablas se presentan resúmenes de varios casos de análisis realizados y que se discutirán más adelante.

Herramienta de Determinación de Saturación de Capas Granulares.

Para la determinación de la saturación de las capas granulares de desarrolló una herramienta basada en la teoría utilizada por la guía MEPDG. Los parámetros de entrada corresponden a la granulometría del material y los registros climáticos de la zona en estudio durante el año.

De forma similar al módulo de clima anteriormente presentado, la primera entrada de esta herramienta corresponde a la entrada de los registros climáticos. Esta presenta una diferencia importante en cuanto a que requiere los registros de temperatura, pero también los de precipitación. A continuación se muestra la ventana de entrada:



*Figura 2.68: Pantalla de introducción de datos de precipitación.
Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.*

Descripción de interfaz:

1. Cuadro de datos de información del clima, debe llenarse con la información de temperatura media diaria (°C) y precipitación (°F) para todos los días del año. Para esto se debe inicialmente introducir los datos en el botón siguiente.
2. Introducir datos: Abre el archivo de Excel destinado para introducir los datos de clima, en el anexo 5 se muestran capturas de este archivo. Deben introducirse datos de todos los días del año de estudio. Posteriormente a la introducción de los datos se pica el botón marcado con el número 3.
3. Cargar datos: Al picar este botón se importan los datos introducidos en el archivo de Excel para ser introducidos en la memoria propia del programa. Al presionar este botón los datos se vuelven visibles en el cuadro 1.
4. Sale de la ventana.

5. Sale de la ventana para continuar con la siguiente.

Cuando se termina de introducir datos en la ventana anterior y se presiona el botón “Aceptar”, se presenta una ventana cuyo objetivo es por medio de la metodología estadística de las diferencias medias determinar perfiles climáticos.

La forma de determinar dichos perfiles consiste en delimitar periodos dentro del año que cuenten con pendiente nula o similar, a continuación se muestra una captura de la ventana:



Figura 2.69: Pantalla de resultados de los Perfiles Climáticos.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Representación de las diferencias medias de temperatura a partir de los datos introducidos en la ventana anterior.
2. Lista que contiene el número de perfiles que el usuario considera existen según lo mostrado en 1. De acuerdo a la figura anterior existen 3 perfiles, un perfil al inicio del año con pendiente creciente, un perfil al segundo tercio del año con una pendiente relativamente constante y un perfil al final del año con una pendiente decreciente.
3. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del primer perfil.
4. Lista donde el usuario indica la fecha de inicio del segundo perfil.
5. Sale de la ventana.
6. Sale de la ventana, continua con la siguiente y guarda los datos.

Posteriormente a la introducción de los datos climáticos, descrita en las 2 ventanas anteriores, se procede a introducir los datos característicos del material. Es necesario contar con la siguiente información para realizar el análisis:

- **Plasticidad del material.**
- **Curva granulométrica.**
- **Porcentaje de humedad óptimo**
- **Gravedad específica**
- **Índice de Vacíos.**

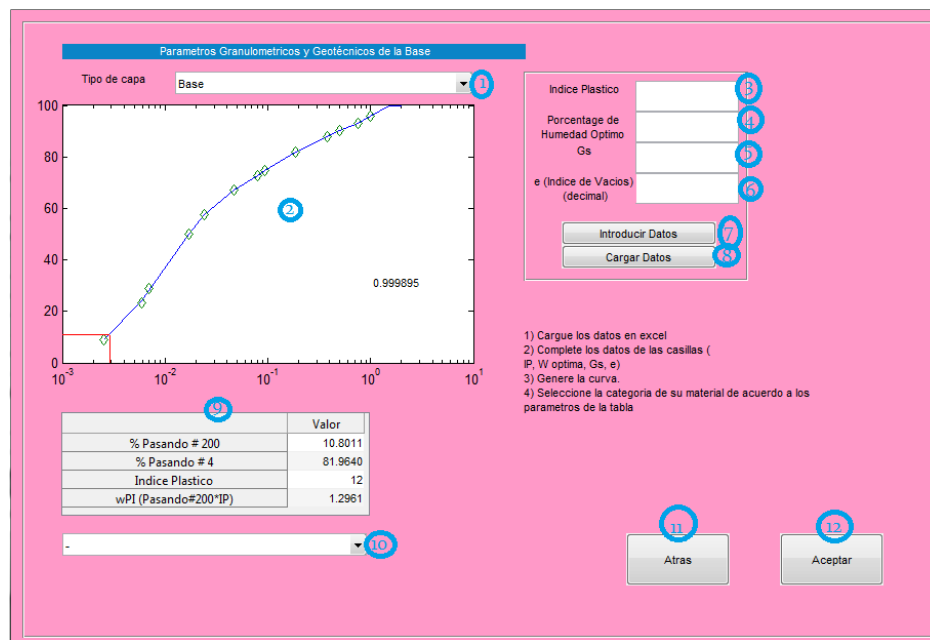


Figura 2.70: Pantalla de introducción de datos de precipitación.
 Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

Descripción de interfaz:

1. Tipo de material a analizar: Existen 2 clasificaciones de materiales para efectos de esta teoría: a) bases b) sub-bases y sub-rasantes.
2. Curva granulométrica.
3. Índice plástico del material.

4. Porcentaje de humedad óptimo.
5. Gravedad específica.
6. Índice de vacíos del material.
7. Introducir datos: Abre el archivo de Excel destinado para introducir los datos de granulometría del material (% pasando y diámetro de las aberturas de la malla).
8. Posterior a la edición del archivo de Excel, este botón se pica para generar la curva granulométrica.
9. Cuadro resumen de las características del material, generada a partir de los datos introducidos en 1-7.
10. Lista que contiene varios modelos de material correspondientes a las figuras 10 y 11. Varía de acuerdo a la selección realizada en 1.
11. Sale de la ventana.
12. Sale de la ventana y guarda los datos.

Posterior a la finalización de la entrada de datos se presenta una ventana que contiene el resultado del cálculo de la saturación del material en cuestión para su posterior utilización en el módulo de clima. A continuación se presenta el resultado final:

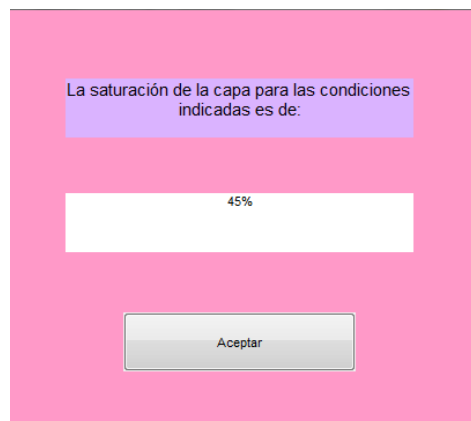


Figura 2.72: Pantalla del cálculo de la Saturación.

Fuente: Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecánica para Costa Rica.

**CAPITULO III: GENERACION DE
ESPECTROS DE CARGA Y
FACTORES CAMION PARA EL
SALVADOR.**

3.1 GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA

Debido que el tráfico es un factor indispensable en el diseño estructural de pavimentos, es necesario para la determinación de la magnitud de las cargas transmitidas al pavimento, la frecuencia con que son transmitidas durante el horizonte de proyecto establecido, la caracterización correcta de los datos de tráfico es fundamental para poder desarrollar carreteras con pavimentos capaces de poder ofrecer altos desempeños con respecto a su durabilidad.

Las principales carreteras que destacan en nuestro país con un tráfico pesado son:

-La carretera Troncal del Norte

-La Carretera Panamericana

-La Carretera El Litoral

-La Carretera Los Chorros

-La Carretera Longitudinal del Norte.

La mayor carga es obviamente representada por el tráfico pesado, por lo que es este tipo de tráfico decisivo en el proceso de diseño, para tener una mejor regulación y control actualmente existe la LEY ESPECIAL DE TRANSPORTE DE CARGA POR CARRETERA, en la cual se establecen los pesos legales máximos para nuestro país, los cuales no deberían ser superados, para el debido control de los pesos que transitan por nuestro país, existen estaciones de pesaje fijas.

3.1.1 PESOS MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EL SALVADOR.

El artículo 28 de la Ley Especial de transporte de Carga por Carretera Establece. " Para el control de pesos y dimensiones se utilizarán las básculas, cuya operación y gestión de riesgos estará sujeta a la vigilancia y control del Estado, en coordinación con las autoridades competentes."

Para lo cual se deben establecer, puntos estratégicos, dentro de la red Vial, para hacer un control aleatorio y selectivo de los Vehículos Pesados. Los tipos de básculas pueden ser básculas fijas y basculas móviles.

PESO MÁXIMO PERMISIBLE POR TIPO DE VEHÍCULO.














TIPO DE VEH.	ESQUEMA DEL VEHICULO	PESO MAXIMO AUTORIZADO						DIMENSIONES MAXIMAS EN METROS			
		1er. EJE	2do. EJE	3er. EJE	4to. EJE	5to. EJE	6to. EJE	PESO TOTAL EN TON. Mts.	LARGO	ANCHO	ALTO
1 C-2A		ENTRE 1.5 4	ENTRE 2.5 6					4.0 A 10.0	7.0	2.6	4.15
2 C-2		5.00	10.00					15.00	12.0	2.6	4.15
3 C-3		5.00	16.50					21.50	12.0	2.6	4.15
			8.25	8.25							
4 C-4		5.00	20.00					25.00	16.75	2.6	4.15
			6.67	6.66	6.65						
5 T2-S1		5.00	9.00	9.00				23.00	16.75	2.6	4.15
6 T2-S2		5.00	9.00	16.00				30.00	17.5	2.6	4.15
			8.00	8.00							
7 T2-S3		5.00	9.00	20.00				34.00	17.5	2.6	4.15
			6.67	6.67	6.66						
8 T3-S1		5.00	16.00		9.00			30.00	20.3	2.6	4.15
			8.00	8.00							
9 T3-S2		5.00	16.00		16.00			37.00		2.6	4.15
			8.00	8.00	8.00	8.00					
10 T3-S3		5.00	16.00		20.00			41.00		2.6	4.15
			8.00	8.00	6.67	6.67	6.66				
11 C2-R2		5.00 5.00	10.00 10.00	4.5a 4.5a 7.0a	4.5a 7.0b 7.0b			24.00 26.50 29.00	18.3	2.6	4.15
12 C3-R2		5.00 5.00 5.00	16.50		4.5a	4.5a		30.50	18.3	2.6	4.15
			8.25	8.25	4.5a 7.0b	7.0b 7.0b		33.00 35.50			
13 C3-R3		5.00	16.50		4.0a	13.00		38.50	18.3	2.6	4.15
		5.00	8.25	8.25	6.5b	6.50	6.50	41.00			

Figura 3.1: Pesos máximos regulados para El Salvador

FUENTE: Artículo 21, de la LEY ESPECIAL DE TRANSPORTE DE CARGA POR CARRETERA.

Se admitirá una variación hasta del 5% en la dimensión y el peso por el eje, indicado en todos Los vehículos de transporte de carga, siempre que el peso bruto vehicular no exceda del peso máximo.

TIPO DE EJE	PESOS MAXIMOS POR EJE
Sencillo Direccional	5 toneladas
Sencillo dual	10 toneladas
tándem	16.5 toneladas
Trídem	20 toneladas

Tabla 3.1: Peso máximo permisible por tipo de eje.

Fuente: Ley Especial de Transporte de Carga por Carretera.

TICKETS DE PESAJE DE VEHÍCULOS PESADOS.

04/24/2014		10:38AM		14149	
RUP					
Estacion Pesaje Acajutla-Sonsonate					

Vehiculo	3 / T3-S2				
# Placa	C-105543				
Pais	0				
Carga	LLP1-01				
Origen	0				
Destino	0				

EJES	PESO	SUPERPESO	%		

Eje 1	4500 kg	0 kg	0 %		
Eje 2,3	17150 kg	1150 kg	7 %		
Eje 4,5	12600 kg	0 kg	0 %		

TOTAL PESO	=	34300 kg			
TOTAL SUPERPESO	=	1150 kg			

04/24/2014		10:38AM		14150	
RUP					
Estacion Pesaje Acajutla-Sonsonate					

Vehiculo	3 / T3-S2				
# Placa	C-105543				
Pais	0				
Carga	LLP1-01				
Origen	0				
Destino	0				

EJES	PESO	SUPERPESO	%		

Eje 1	4500 kg	0 kg	0 %		
Eje 2,3	14550 kg	0 kg	0 %		
Eje 4,5	13500 kg	0 kg	0 %		

TOTAL PESO	=	32550 kg			
TOTAL SUPERPESO	=	0 kg			

Figura 3.2: impresión de tickets de pesaje.

Se puede observar en las imágenes, tickets de pesaje, de la estación Acajutla-Sonsonate, correspondiente a T3-S2, puede observarse en el ticket a la izquierda, se tiene sobrepeso, no así en el ticket a la derecha.

3.1.2 CARACTERISTICAS DE UN ESPECTRO DE CARGA.

Para fines de diseño, rehabilitación, modernización, reconstrucción, preservación y operación de carreteras, para tener una mejor caracterización del tránsito vehicular, es necesaria la elaboración de espectros de carga de cada uno de los diferentes ejes, que podemos observar en las diferentes configuraciones vehiculares.

El concepto de espectro de carga, ha sido usada como factor fundamental en la caracterización del Tránsito en la Guía de Diseño MEPDG.

- a) Un punto en el espectro de carga representa el porcentaje del tipo de ejes en cuestión, que circula normalmente en la Vía estudiada.
- b) El área bajo la curva de un espectro de carga es unitaria.
- c) Para la realización del espectro de carga, se deben tomar los datos del tránsito pesado circulando en la Vía, a lo cual puede dársele seguimiento a través del tiempo y así se puede ver el cambio en la caracterización del tránsito.
- d) Los picos o valores máximos en los espectros de carga, representan los niveles de carga más usuales, los cuales pueden ser normalmente dos, el primero representado por el porcentaje de ejes de cierto tipo que circulan vacíos o parcialmente cargado y el otro por el porcentaje de vehículos pesados de ese tipo de eje circulando cargado.
- e) Se puede identificar en que tramos se está violando el reglamento de ley en el que se establecen los pesos máximos por eje.
- f) Se pueden realizar análisis comparativos, en cuanto al comportamiento de los espectros de carga, en diferentes vías.
- g) Para propósitos de diseño estructural de un pavimento, se puede representar los datos reales en cuanto a la caracterización del tránsito.
- h) Se puede hacer una mejor predicción del comportamiento del tránsito a lo largo del tiempo, y de esa forma lograr un mejor desempeño de la carretera.

3.1.3 ESPECTROS DE CARGA PARA EL SALVADOR

Se presentan los espectros de carga, correspondientes a la recolección de datos de los años 2012 y 2013, de las estaciones de pesaje Acajutla (Sonsonate), Zacatecoluca (La Paz) y datos obtenidos por una estación móvil de pesaje.

ESPECTROS 2012.

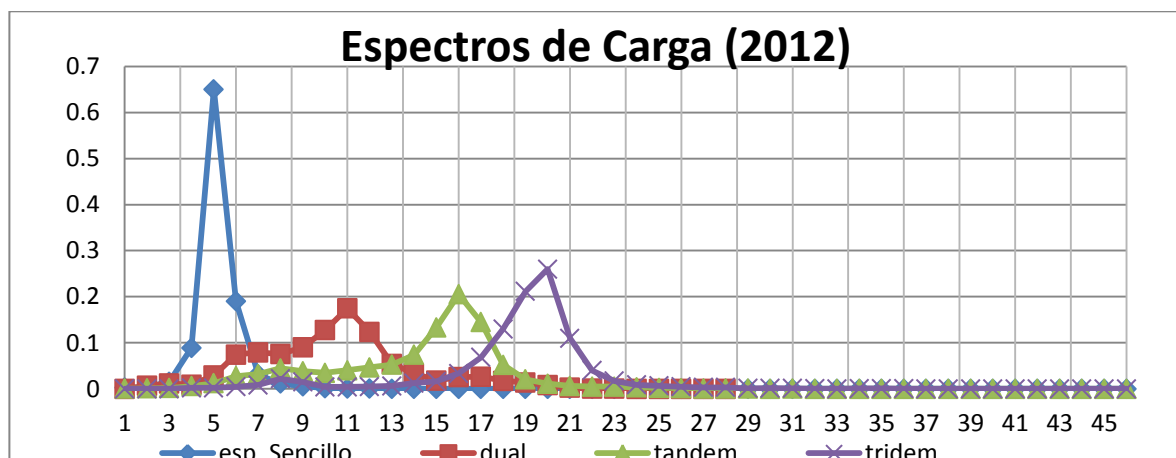


Figura 3.3: Espectros de carga año 2012.

ESPECTRO 2013.

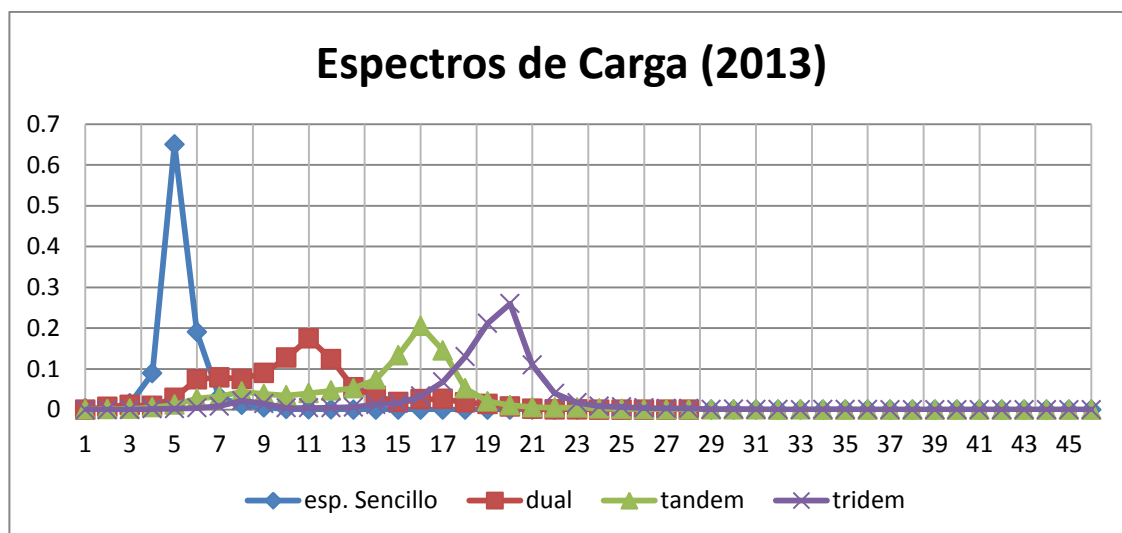


Figura 3.4: Espectros de carga año 2013.

ESPECTROS (2012 Y 2013)

Al poder observar una tendencia similar en los años 2012 y 2013 en sus espectros por separado, podemos tener una caracterización más precisa ampliando así el período de recolección de datos, generando los espectros de carga para los años 2012 y 2013.

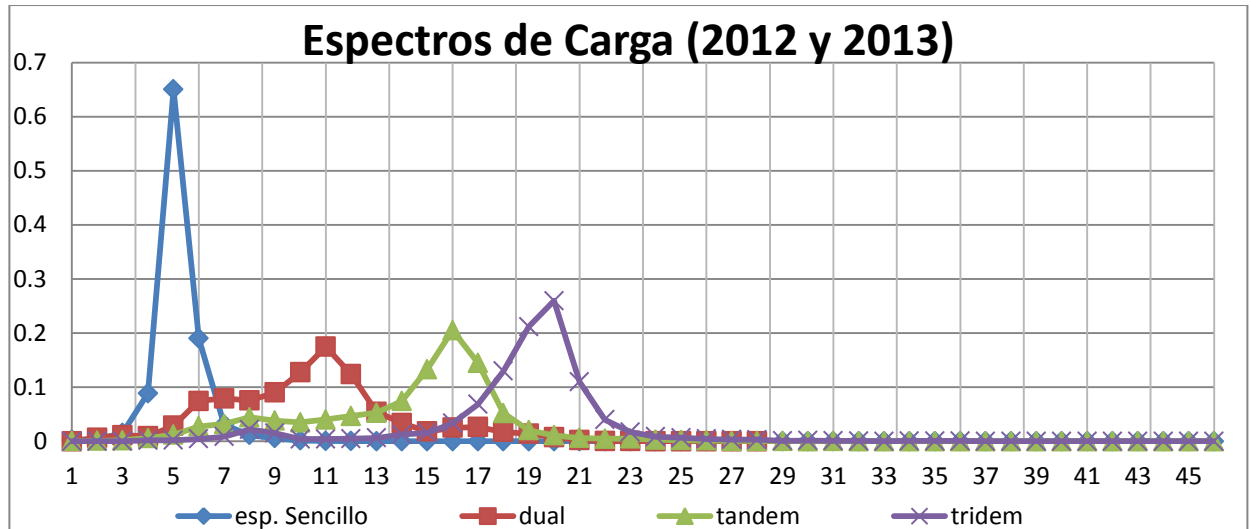


Figura 3.5: Espectros de carga para los años 2012 y 2013.

Fuente: Propia

3.1.3.1 ESPECTROS NORMALIZADOS PARA LOS AÑOS 2012 Y 2013.

ESPECTRO SENCILLO.

Lim. Inf (kg)	Lim. Sup(kg)	Media (kg)	Media (ton)	Muestra	Espectro Normalizado
0	1000	500	0.5	0	0
1000	2000	1500	1.5	173	0.00269811
2000	3000	2500	2.5	909	0.01417677
3000	4000	3500	3.5	5148	0.08028821
4000	5000	4500	4.5	41138	0.6415883
5000	6000	5500	5.5	13989	0.21817246
6000	7000	6500	6.5	1997	0.03114521
7000	8000	7500	7.5	500	0.007798
8000	9000	8500	8.5	189	0.00294764
9000	10000	9500	9.5	52	0.00081099
10000	11000	10500	10.5	14	0.00021834
11000	12000	11500	11.5	5	7.798E-05
12000	13000	12500	12.5	1	1.5596E-05
13000	14000	13500	13.5	2	3.1192E-05
14000	15000	14500	14.5	2	3.1192E-05
15000	16000	15500	15.5	0	0
16000	17000	16500	16.5	0	0
				64119	1

Tabla 3.2: Datos para generación de espectro de carga para eje sencillo

Fuente: Propia

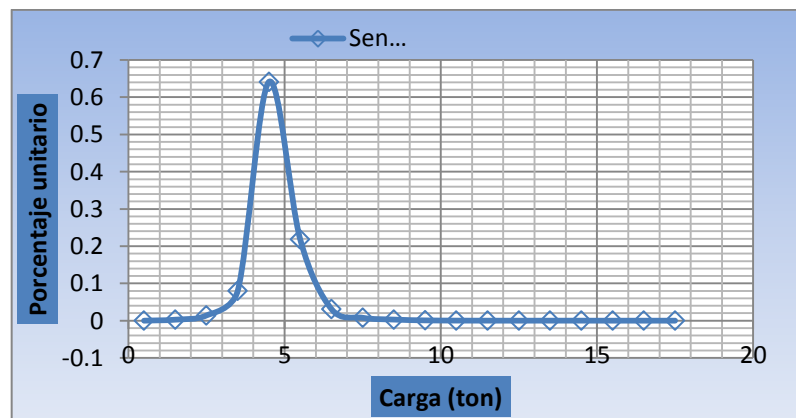


Figura 3.6: Espectro de carga para eje sencillo.

Fuente: Propia

ESPECTRO SENCILLO DUAL.

Lim. Inf (kg)	Lim. Sup (kg)	Media (kg)	Media (ton)	Muestra	Espectro Normalizado
0	1000	500	0.5	0	0
1000	2000	1500	1.5	69	0.005778411
2000	3000	2500	2.5	120	0.01004941
3000	4000	3500	3.5	382	0.031990621
4000	5000	4500	4.5	757	0.063395026
5000	6000	5500	5.5	914	0.076543003
6000	7000	6500	6.5	848	0.071015828
7000	8000	7500	7.5	1069	0.08952349
8000	9000	8500	8.5	1670	0.139854284
9000	10000	9500	9.5	2354	0.197135918
10000	11000	10500	10.5	1602	0.134159618
11000	12000	11500	11.5	632	0.052926891
12000	13000	12500	12.5	379	0.031739385
13000	14000	13500	13.5	229	0.019177623
14000	15000	14500	14.5	258	0.021606231
15000	16000	15500	15.5	249	0.020852525
16000	17000	16500	16.5	170	0.014236664
17000	18000	17500	17.5	132	0.011054351
18000	19000	18500	18.5	74	0.006197136
19000	20000	19500	19.5	26	0.002177372
20000	21000	20500	20.5	5	0.000418725
21000	22000	21500	21.5	2	0.00016749
22000	23000	22500	22.5	0	0
				11941	1

Tabla 3.3: Datos para generación de espectro de carga para eje sencillo dual

Fuente: Propia.

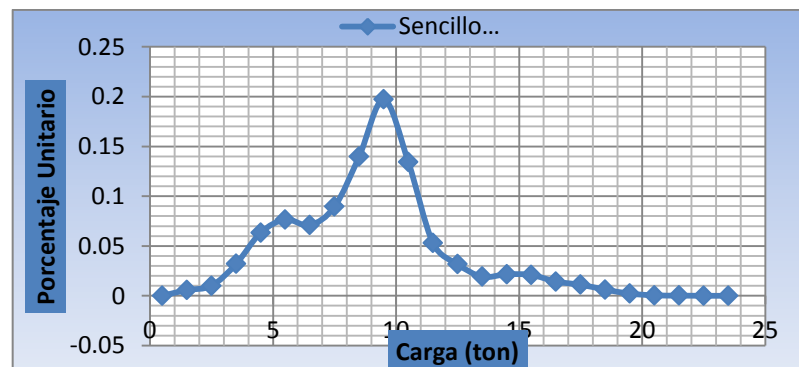


Figura 3.7: Espectro de carga, eje sencillo dual.

Fuente: Propia.

ESPECTRO TANDEM.

Lim. Inf (kg)	Lim. Sup(kg)	Media (kg)	Media (ton)	Muestra	Espectro Normalizado
0	1000	500	0.5	0	0
1000	2000	1500	1.5	0	0
2000	3000	2500	2.5	0	0
3000	4000	3500	3.5	262	0.00308562
4000	5000	4500	4.5	687	0.00809092
5000	6000	5500	5.5	1803	0.02123425
6000	7000	6500	6.5	2431	0.02863031
7000	8000	7500	7.5	3477	0.04094924
8000	9000	8500	8.5	3518	0.0414321
9000	10000	9500	9.5	3565	0.04198563
10000	11000	10500	10.5	3974	0.0468025
11000	12000	11500	11.5	4708	0.05544694
12000	13000	12500	12.5	5240	0.0617124
13000	14000	13500	13.5	7387	0.086998
14000	15000	14500	14.5	12506	0.14728536
15000	16000	15500	15.5	16835	0.19826876
16000	17000	16500	16.5	10641	0.12532093
17000	18000	17500	17.5	3585	0.04222118
18000	19000	18500	18.5	1526	0.01797197
19000	20000	19500	19.5	971	0.01143564
20000	21000	20500	20.5	540	0.00635967
21000	22000	21500	21.5	381	0.0044871
22000	23000	22500	22.5	316	0.00372159
23000	24000	23500	23.5	210	0.00247321
24000	25000	24500	24.5	142	0.00167236
25000	26000	25500	25.5	94	0.00110705
26000	27000	26500	26.5	50	0.00058886
27000	28000	27500	27.5	35	0.0004122
28000	29000	28500	28.5	20	0.00023554
29000	30000	29500	29.5	6	7.0663E-05
30000	31000	30500	30.5	0	0
				84910	1

Tabla 3.4: Datos para generación de espectro de carga para eje tandem.

Fuente: Propia

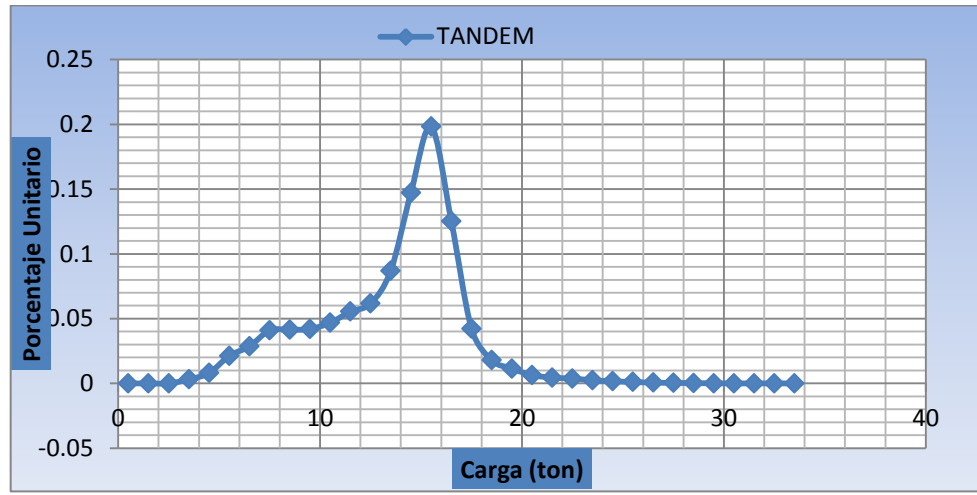


Figura 3.8: gráfico espectro de carga eje tándem.

Fuente: Propia

ESPECTRO TRÍDEM.

lim. Inf	lim. Sup	Media (kg)	media (ton)	Muestra	espectro normalizado
0	1000	500	0.5	0	0
1000	2000	1500	1.5	0	0
2000	3000	2500	2.5	0	0
3000	4000	3500	3.5	0	0
4000	5000	4500	4.5	4	0.00020104
5000	6000	5500	5.5	31	0.00155802
6000	7000	6500	6.5	52	0.00261346
7000	8000	7500	7.5	166	0.00834297
8000	9000	8500	8.5	135	0.00678494
9000	10000	9500	9.5	61	0.00306579
10000	11000	10500	10.5	93	0.00467407
11000	12000	11500	11.5	104	0.00522692
12000	13000	12500	12.5	132	0.00663417
13000	14000	13500	13.5	184	0.00924763
14000	15000	14500	14.5	288	0.01447454
15000	16000	15500	15.5	643	0.03231643
16000	17000	16500	16.5	1357	0.06820124
17000	18000	17500	17.5	2835	0.14248379
18000	19000	18500	18.5	4203	0.21123788
19000	20000	19500	19.5	5231	0.26290396
20000	21000	20500	20.5	2654	0.13338694
21000	22000	21500	21.5	857	0.04307182
22000	23000	22500	22.5	315	0.01583153
23000	24000	23500	23.5	141	0.0070865
24000	25000	24500	24.5	109	0.00547821
25000	26000	25500	25.5	75	0.00376941
26000	27000	26500	26.5	64	0.00321657
27000	28000	27500	27.5	51	0.0025632
28000	29000	28500	28.5	27	0.00135699
29000	30000	29500	29.5	34	0.0017088
30000	31000	30500	30.5	18	0.00090466
31000	32000	31500	31.5	8	0.00040207
32000	33000	32500	32.5	7	0.00035181
33000	34000	33500	33.5	7	0.00035181
34000	35000	34500	34.5	6	0.00030155
35000	36000	35500	35.5	2	0.00010052
36000	37000	36500	36.5	2	0.00010052
37000	38000	37500	37.5	1	5.0259E-05
				19897	1

Tabla 3.5: Datos para generación de espectro de carga para eje trídém.

Fuente: Propia.

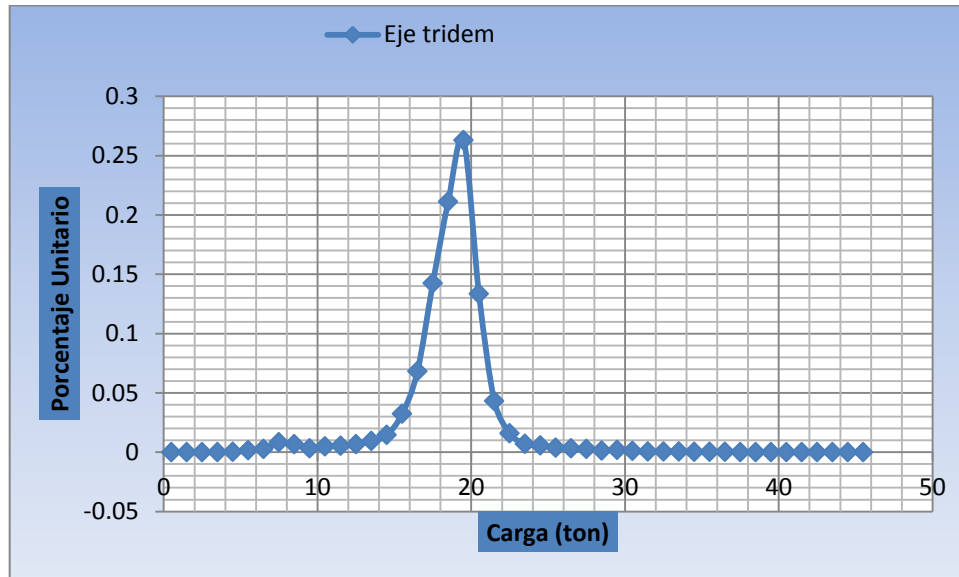


Figura 3.9: gráfico espectro de carga eje Trídem.

Fuente: Propia

3.1.4 AJUSTE DE ESPECTROS DE CARGA, PARA LA INTRODUCCIÓN AL IMT-PAVE 1.2

Para la introducción de los espectros de carga, al IMT-PAVE 1.2, es necesaria la realización de un ajuste de datos, para cada espectro generado por cada uno de los ejes en estudio, para ello es necesario ajustarlo a una función log-normal, esto debido a la naturaleza de los datos estudiados, lo cual representa una cantidad muy grande, debido a que se cuenta con una gran inmensa cantidad de datos, por lo que al generar el histograma, e ir disminuyendo el tamaño de la clase, habrá una suavización del espectro, la cual simplemente seguiría la tendencia que tiene para intervalos de clases grandes.

La distribución de frecuencias es del tipo multimodal, lo cual quiere decir que se tienen más de una moda, y por consiguiente más de una media, por ejemplo se tendría un valor máximo de un determinado eje para los camiones que circulen vacíos y los que circulen a su máxima capacidad, dicho ajuste consiste en proponer tres media, y tres desviaciones estándar para formar un solo ajuste, y también la introducción de tres pesos los cuales representan el porcentaje de participación de cada una de las funciones caracterizadas por cada media y

desviación estándar introducida, la suma de dichas funciones representa, el espectro de carga ajustado.

3.1.4.1 DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL DE DOS PARÁMETROS

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente se dice que X se distribuye normalmente.

Función de densidad:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2}$$

Ecuación 3.1: función de densidad de una distribución log-normal, para valores $x > 0$.
Donde:

μ = Valor de la media, (Introducido en logaritmos)

σ = Desviación estándar (introducido en logaritmos)

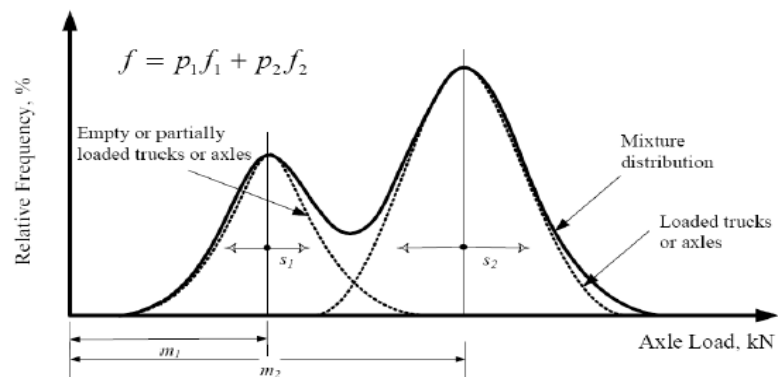


Figura 3.10: Distribución multimodal de frecuencia.

El gráfico representa dos picos, el primero para camiones o ejes vacíos o parcialmente cargados, y el segundo para camiones o ejes cargados.

$$f(x) = W_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_1}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2} + W_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_2}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_2}{\sigma_2} \right)^2} + W_3 \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_3}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_3}{\sigma_3} \right)^2}$$

Ecuación 3.2: distribución log-normal multimodal

Donde se representa la suma de tres distribuciones log-normal, donde están amparados por W_1 , W_2 , W_3 , lo cual representa el porcentaje de participación para cada distribución en cuestión, la suma de dichos pesos será de uno.

3.1.4.2 ESPECTROS DE CARGA AJUSTADOS.

ESPECTRO DE CARGA SENCILLO.

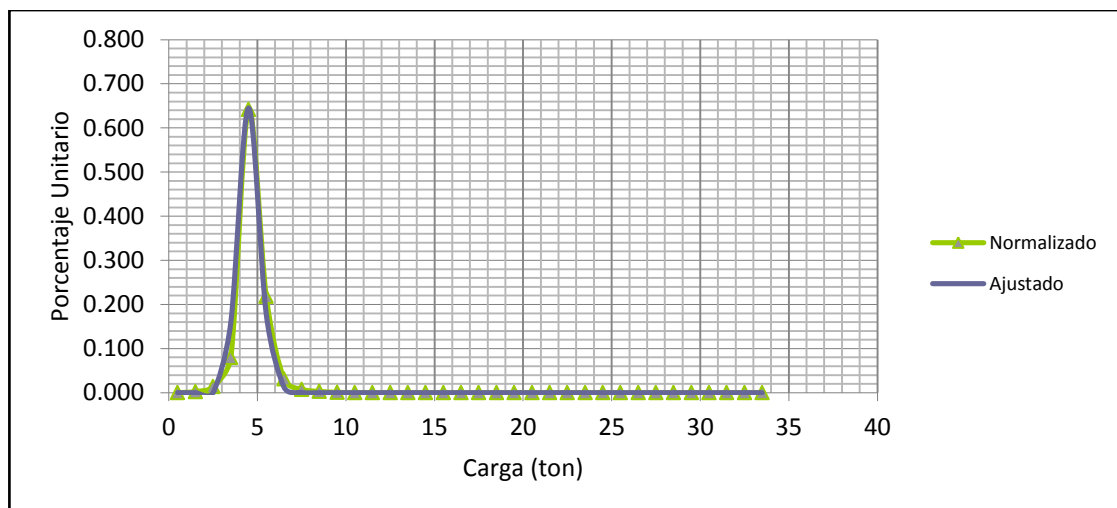


Figura 3.10: Espectro de carga sencillo ajustado

Fuente: Propia

ESPECTRO DE CARGA SENCILLO DUAL.

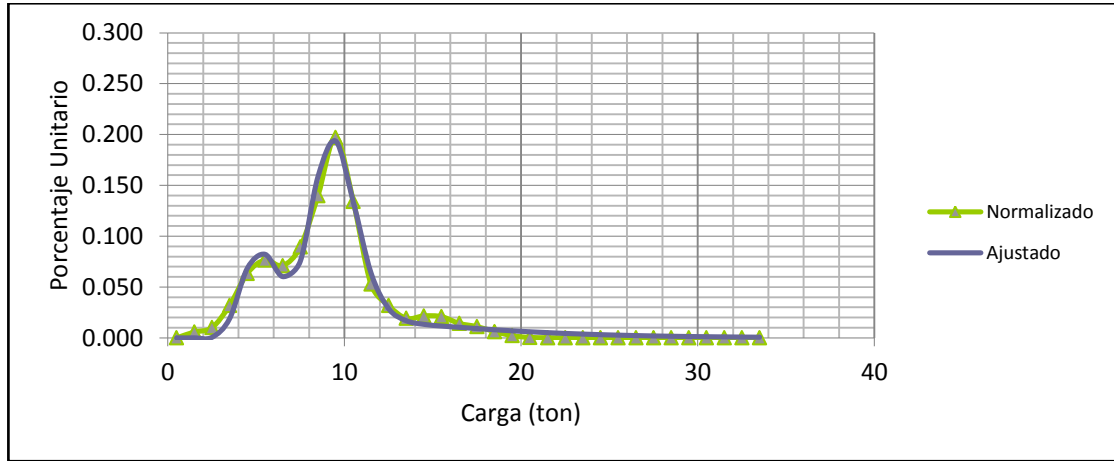


Figura 3.11: Espectro de carga sencillo dual ajustado

Fuente: Propia.

ESPECTRO DE CARGA TANDEM.

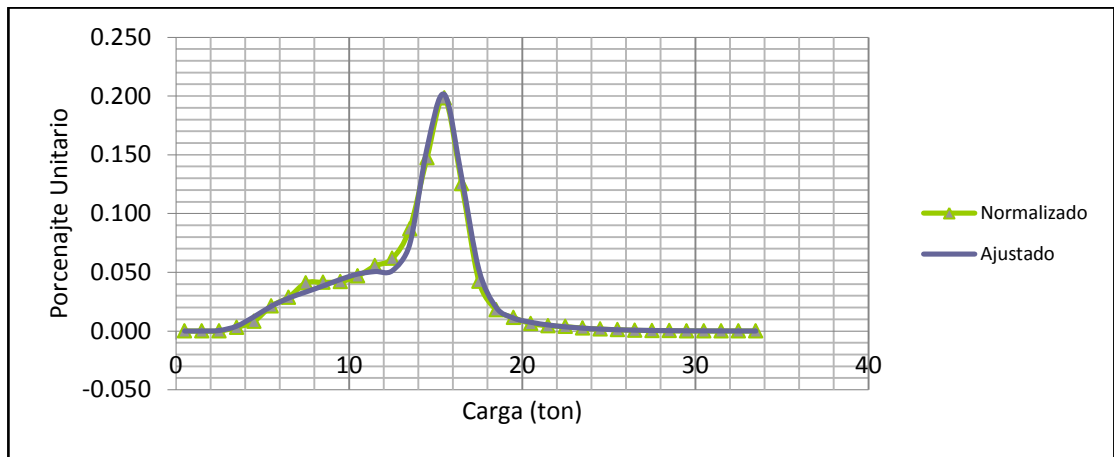


Figura 3.12: Espectro de carga Tándem ajustado.

Fuente: Propia

ESPECTRO DE CARGA TRÍDEM

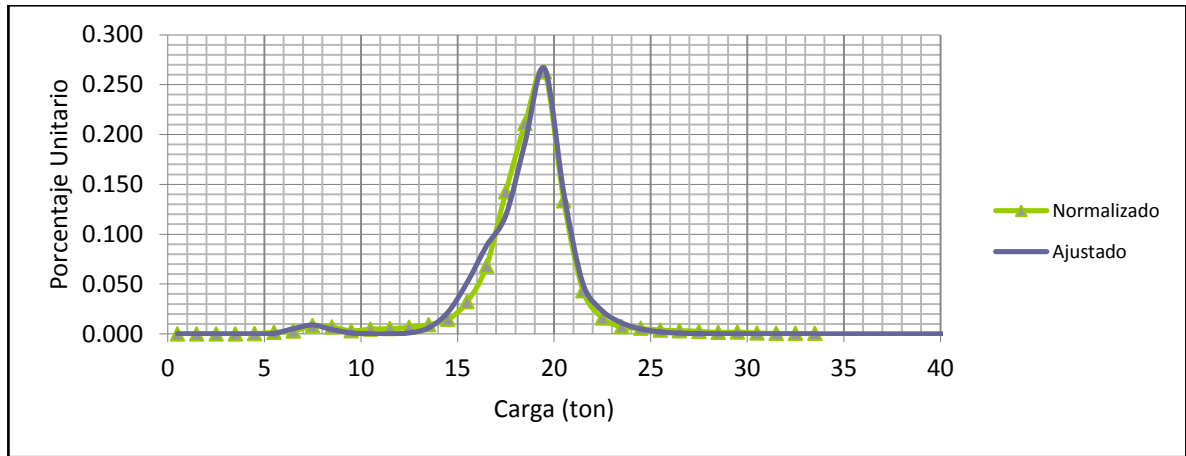


Figura 3.13: Espectro de carga trídém, ajustado.

Fuente: Propia.

3.1.5 RESULTADO DE AJUSTE DE ESPECTROS.

SENCILLO		
Peso	Media	Desv. Est
0.6000	1.5041	0.1300
0.2000	1.4900	0.1500
0.2000	1.5100	0.1500

Tabla 3.6: Resultado ajuste espectro sencillo

Fuente: Propia.

SENCILLO DUAL		
Peso	Media	Desv. Est
0.2500	1.7000	0.2300
0.5500	2.2500	0.1300
0.2000	2.6300	0.4300

Tabla 3.7: Resultado ajuste espectro sencillo dual.

Fuente: Propia.

TANDEM		
Peso	Media	Desv. Est
0.2100	2.1400	0.3800
0.3300	2.6000	0.2600
0.4600	2.7400	0.0700

Tabla 3.8: Resultado de ajuste espectro tándem.

Fuente: Propia.

TRÍDEM		
Peso	Media	Desv. Est
0.0200	2.0100	0.1200
0.6500	2.9100	0.1200
0.3300	2.9700	0.0400

Tabla 3.9: Resultado de ajuste espectro trídem.

Fuente: Propia.

Factores de correlación: se establece un factor de correlación entre los espectros normalizados y los espectros ajustados, el cual idealmente es de uno, por lo que se presenta un resumen de los factores de correlación, para los espectros ajustados anteriormente.

FACTOR DE CORRELACION	
SENCILLO	0.9904
SENCILLO DUAL	0.9905
TANDEM	0.9959
TRÍDEM	0.9925

Tabla 3.10: factores de correlación, entre espectros normalizados y ajustados.

Fuente: Propia.

3.2 PORCENTAJES DE DISTRIBUCIÓN VEHICULAR.

Para tener un mejor punto de análisis, se presentan los porcentajes de vehículos de cada tipo de los vehículos registrados para cada año.

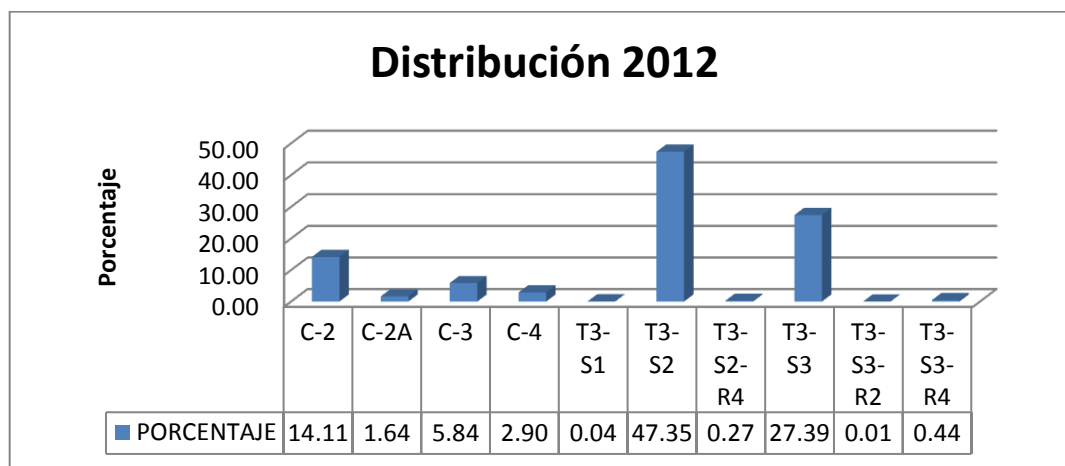


Figura 3.14: distribución vehicular, año 2012

Fuente: Propia.

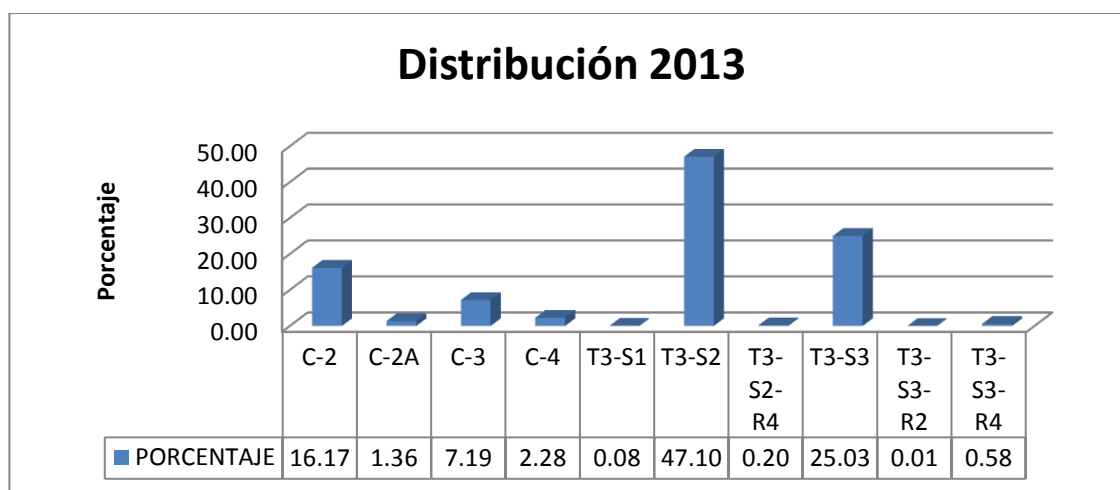


Figura 3.15: distribución vehicular, año 2013.

Fuente: Propia.

De lo anterior podemos concluir que el mayor porcentaje de vehículos pesados, que cruzan por nuestras principales vías son los T3-S2, seguidos por el T3-S3, luego por los camiones unitarios C-2, y en menores porcentajes por las demás configuraciones vehiculares.

3.3 DETERMINACION DE FACTORES CAMION PARA EL SALVADOR.

Registro de Vehículos C-2.

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL
Direccional	0,91	2	6	0,0004	0,0024
Direccional	1,82	4	6	0,003	0,018
Direccional	2,73	6	145	0,013	1,885
Direccional	3,64	8	1361	0,041	55,801
Direccional	4,55	10	3514	0,102	358,428
Direccional	5,45	12	3187	0,213	678,831
Direccional	6,36	14	838	0,388	325,144
Direccional	7,27	16	259	0,645	167,055
Direccional	8,18	18	72	1	72
Direccional	9,09	20	14	1,47	20,58
Sencillo	0,91	2	1	0,0004	0,0004
Sencillo	1,82	4	3	0,003	0,009
Sencillo	2,73	6	11	0,013	0,143
Sencillo	3,64	8	93	0,041	3,813
Sencillo	4,55	10	319	0,102	32,538
Sencillo	5,45	12	546	0,213	116,298
Sencillo	6,36	14	574	0,388	222,712
Sencillo	7,27	16	608	0,645	392,16
Sencillo	8,18	18	937	1	937
Sencillo	9,09	20	1383	1,47	2033,01
Sencillo	10,00	22	1883	2,09	3935,47
Sencillo	10,91	24	1398	2,89	4040,22
Sencillo	11,82	26	473	3,91	1849,43
Sencillo	12,73	28	294	5,21	1531,74
Sencillo	13,64	30	184	6,8	1251,2
Sencillo	14,55	32	160	8,8	1408
Sencillo	15,45	34	176	11,3	1988,8
Sencillo	16,36	36	125	14,4	1800
Sencillo	17,27	38	101	18,1	1828,1
Sencillo	18,18	40	74	22,5	1665
Sencillo	19,09	42	39	27,8	1084,2
Sencillo	20,00	44	14	34	476
Sencillo	20,91	46	5	41,4	207
Sencillo	21,82	48	1	50,1	50,1

Tabla 3.11. Factor camión C-2

Fuente: Propia.

$$FC_{C-2} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{28532.69}{9401} = 3.03$$

Ecuación 3.3: factor camión C-2

Registro de vehículos C-2A

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	0,91	2	47	0,0004	0,0188
Direccional	1,82	4	128	0,003	0,384
Direccional	2,73	6	351	0,013	4,563
Direccional	3,64	8	392	0,041	16,072
Direccional	4,55	10	55	0,102	5,61
Direccional	5,45	12	14	0,213	2,982
Direccional	6,36	14	1	0,388	0,388
Direccional	7,27	16	1	0,645	0,645
Direccional	9,09	20	2	1,47	2,94
Direccional	11,82	26	1	3,91	3,91
Direccional	15,45	34	1	11,3	11,3
Sencillo	0,91	2	43	0,0004	0,0172
Sencillo	1,82	4	68	0,003	0,204
Sencillo	2,73	6	64	0,013	0,832
Sencillo	3,64	8	121	0,041	4,961
Sencillo	4,55	10	202	0,102	20,604
Sencillo	5,45	12	221	0,213	47,073
Sencillo	6,36	14	154	0,388	59,752
Sencillo	7,27	16	60	0,645	38,7
Sencillo	8,18	18	24	1	24
Sencillo	9,09	20	12	1,47	17,64
Sencillo	10,00	22	10	2,09	20,9
Sencillo	10,91	24	5	2,89	14,45
Sencillo	11,82	26	4	3,91	15,64
Sencillo	12,73	28	1	5,21	5,21
Sencillo	14,55	32	2	8,8	17,6
Sencillo	15,45	34	1	11,3	11,3
Sencillo	16,36	36	1	14,4	14,4

Tabla 3.12: Factor camión C-2A

Fuente: Propia

$$FC_{C-2A} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{362,096}{993} = 0.36$$

Ecuación 3.3: determinación de factor camión C-2A

Registro de Vehículos C-3

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	0,91	2	1	0,0004	0,0004
Direccional	1,82	4	1	0,003	0,003
Direccional	2,72	6	7	0,013	0,091
Direccional	3,63	8	71	0,041	2,911
Direccional	4,54	10	596	0,102	60,792
Direccional	5,45	12	1419	0,213	302,247
Direccional	6,36	14	1000	0,388	388
Direccional	7,26	16	499	0,645	321,855
Direccional	8,17	18	229	1	229
Direccional	9,08	20	124	1,47	182,28
Direccional	9,99	22	32	2,09	66,88
Direccional	10,90	24	5	2,89	14,45
Direccional	11,81	26	1	3,91	3,91
Tándem	1,82	4	3	0,0003	0,0009
Tándem	2,72	6	1	0,001	0,001
Tándem	3,63	8	3	0,004	0,012
Tándem	4,54	10	5	0,009	0,045
Tándem	5,45	12	13	0,018	0,234
Tándem	6,36	14	21	0,033	0,693
Tándem	7,26	16	26	0,057	1,482
Tándem	8,17	18	23	0,092	2,116
Tándem	9,08	20	31	0,141	4,371
Tándem	9,99	22	53	0,207	10,971
Tándem	10,90	24	145	0,292	42,34
Tándem	11,81	26	178	0,401	71,378
Tándem	12,71	28	242	0,534	129,228
Tándem	13,62	30	431	0,695	299,545
Tándem	14,53	32	532	0,887	471,884
Tándem	15,44	34	748	1,11	830,28
Tándem	16,35	36	470	1,38	648,6

Continuación.

Tándem	17,25	38	191	1,68	320,88
Tándem	18,16	40	82	2,03	166,46
Tándem	19,07	42	77	2,43	187,11
Tándem	19,98	44	95	2,88	273,6
Tándem	20,89	46	100	3,4	340
Tándem	21,79	48	94	3,98	374,12
Tándem	22,70	50	104	4,64	482,56
Tándem	23,61	52	96	5,38	516,48
Tándem	24,52	54	72	6,22	447,84
Tándem	25,43	56	52	7,2	374,4
Tándem	26,33	58	37	8,2	303,4
Tándem	27,24	60	20	9,4	188
Tándem	28,15	62	19	10,7	203,3
Tándem	29,06	64	10	12,2	122
Tándem	29,97	66	4	13,8	55,2
Tándem	30,87	68	5	15,6	78
Tándem	31,78	70	1	17,6	17,6
Tándem	33,60	74	1	22,2	22,2

Tabla 3.13: factor camión c-3

Fuente: Propia

$$FC_{C-3} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{8558,75}{3985} = 2.15$$

Ecuación 3.4: Determinación de factor camión C-3

Registro de Vehículos C-4

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	2,73	6	5	0,013	0,065
Direccional	3,64	8	35	0,041	1,435
Direccional	4,55	10	296	0,102	30,192
Direccional	5,46	12	820	0,213	174,66
Direccional	6,37	14	416	0,388	161,408
Direccional	7,28	16	151	0,645	97,395
Direccional	8,19	18	24	1	24
Direccional	9,10	20	5	1,47	7,35
Direccional	11,83	26	1	3,91	3,91
Trídem	6,37	14	1	0,008	0,008
Trídem	7,28	16	4	0,013	0,052
Trídem	8,19	18	3	0,021	0,063
Trídem	9,10	20	2	0,032	0,064
Trídem	10,01	22	1	0,048	0,048
Trídem	10,92	24	3	0,068	0,204
Trídem	11,83	26	9	0,095	0,855
Trídem	12,74	28	12	0,128	1,536
Trídem	13,65	30	35	0,17	5,95
Trídem	14,56	32	44	0,22	9,68
Trídem	15,47	34	127	0,281	35,687
Trídem	16,38	36	205	0,352	72,16
Trídem	17,29	38	215	0,436	93,74
Trídem	18,20	40	299	0,533	159,367
Trídem	19,11	42	349	0,644	224,756
Trídem	20,02	44	256	0,769	196,864
Trídem	20,93	46	111	0,911	101,121
Trídem	21,84	48	22	1,069	23,518
Trídem	22,75	50	10	1,25	12,5
Trídem	23,65	52	7	1,44	10,08
Trídem	24,56	54	6	1,66	9,96
Trídem	25,47	56	6	1,9	11,4
Trídem	26,38	58	4	2,16	8,64

Continuación.

Trídem	27,29	60	3	2,44	7,32
Trídem	28,20	62	6	2,76	16,56
Trídem	29,11	64	6	3,1	18,6
Trídem	30,02	66	1	3,47	3,47
Trídem	30,93	68	3	3,88	11,64
Trídem	32,75	72	1	4,8	4,8
Trídem	33,66	74	1	5,32	5,32
Trídem	34,57	76	1	5,88	5,88

Tabla 3.14: factor camión C-4

Fuente: Propia.

$$FC_{C-4} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{1541,048}{1753} = 0.88$$

Ecuación 3.4: Determinación de factor camión C-4

Registro de vehículo T2-S2

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	4,55	10	1	0,102	0,102
Direccional	5,45	12	1	0,213	0,213
Simple	7,27	16	1	0,645	0,645
Simple	10,00	22	1	2,09	2,09
Tándem	10,91	24	1	0,292	0,292
Tándem	12,73	28	1	0,534	0,534

Tabla 3.15: factor camión T2-S2

Fuente: Propia.

$$FC_{T2-S2} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{3.872}{2} = 1.94$$

Ecuación 3.5: Determinación de factor camión T2-S2

Registro de vehículos T3-S1

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	4,55	10	29	0,102	2,958
Direccional	5,45	12	5	0,213	1,065
Tándem	5,45	12	2	0,018	0,036
Tándem	6,36	14	1	0,033	0,033
Tándem	7,27	16	1	0,057	0,057
Tándem	8,18	18	2	0,092	0,184
Tándem	9,09	20	4	0,141	0,564
Tándem	10,00	22	7	0,207	1,449
Tándem	10,91	24	14	0,292	4,088
Tándem	11,82	26	2	0,401	0,802
Tándem	18,18	40	1	2,03	2,03
Sencillo	3,64	8	1	0,041	0,041
Sencillo	4,55	10	1	0,102	0,102
Sencillo	5,45	12	1	0,213	0,213
Sencillo	6,36	14	2	0,388	0,776
Sencillo	7,27	16	2	0,645	1,29
Sencillo	8,18	18	5	1	5
Sencillo	9,09	20	7	1,47	10,29
Sencillo	10,00	22	12	2,09	25,08
Sencillo	10,91	24	1	2,89	2,89
Sencillo	14,55	32	1	8,8	8,8
Sencillo	19,09	42	1	27,8	27,8

Tabla 3.16: Factor camión T3-S1

Fuente: Propia

$$FC_{T3-S1} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{395.548}{34} = 2.81$$

Ecuación 3.6: Determinación de Factor camión T3-S1

Registro de vehículos T3-S2

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	0,91	2	21	0,0004	0,0084
Direccional	1,82	4	2	0,003	0,006
Direccional	3,64	8	163	0,041	6,683
Direccional	4,55	10	11171	0,102	1139,442
Direccional	5,45	12	17176	0,213	3658,488
Direccional	6,36	14	775	0,388	300,7
Direccional	7,27	16	272	0,645	175,44
Direccional	8,18	18	4	1	4
Direccional	9,09	20	6	1,47	8,82
Direccional	10,00	22	3	2,09	6,27
Direccional	10,91	24	5	2,89	14,45
Direccional	12,73	28	2	5,21	10,42
Direccional	13,64	30	2	6,8	13,6
Direccional	14,55	32	2	8,8	17,6
Direccional	15,45	34	1	11,3	11,3
Tándem 1	1,82	4	11	0,0003	0,0033
Tándem 1	2,73	6	1	0,001	0,001
Tándem 1	3,64	8	2	0,004	0,008
Tándem 1	4,55	10	19	0,009	0,171
Tándem 1	5,45	12	193	0,018	3,474
Tándem 1	6,36	14	554	0,033	18,282
Tándem 1	7,27	16	585	0,057	33,345
Tándem 1	8,18	18	964	0,092	88,688
Tándem 1	9,09	20	1306	0,141	184,146
Tándem 1	10,00	22	1445	0,207	299,115
Tándem 1	10,91	24	1671	0,292	487,932
Tándem 1	11,82	26	1933	0,401	775,133
Tándem 1	12,73	28	1928	0,534	1029,552
Tándem 1	13,64	30	2096	0,695	1456,72
Tándem 1	14,55	32	2989	0,887	2651,243
Tándem 1	15,45	34	5504	1,11	6109,44
Tándem 1	16,36	36	5064	1,38	6988,32
Tándem 1	17,27	38	2295	1,68	3855,6
Tándem 1	18,18	40	692	2,03	1404,76

Continuación.

Tándem 1	19,09	42	187	2,43	454,41
Tándem 1	20,00	44	89	2,88	256,32
Tándem 1	20,91	46	42	3,4	142,8
Tándem 1	21,82	48	16	3,98	63,68
Tándem 1	22,73	50	13	4,64	60,32
Tándem 1	23,64	52	4	5,38	21,52
Tándem 1	25,45	56	1	7,2	7,2
Tándem 1	26,36	58	1	8,2	8,2
Tándem 2	1,82	4	10	0,0003	0,003
Tándem 2	2,73	6	7	0,001	0,007
Tándem 2	3,64	8	5	0,004	0,02
Tándem 2	4,55	10	66	0,009	0,594
Tándem 2	5,45	12	372	0,018	6,696
Tándem 2	6,36	14	621	0,033	20,493
Tándem 2	7,27	16	956	0,057	54,492
Tándem 2	8,18	18	1051	0,092	96,692
Tándem 2	9,09	20	1044	0,141	147,204
Tándem 2	10,00	22	1051	0,207	217,557
Tándem 2	10,91	24	1140	0,292	332,88
Tándem 2	11,82	26	1144	0,401	458,744
Tándem 2	12,73	28	1298	0,534	693,132
Tándem 2	13,64	30	1799	0,695	1250,305
Tándem 2	14,55	32	3282	0,887	2911,134
Tándem 2	15,45	34	5542	1,11	6151,62
Tándem 2	16,36	36	5265	1,38	7265,7
Tándem 2	17,27	38	2614	1,68	4391,52
Tándem 2	18,18	40	1048	2,03	2127,44
Tándem 2	19,09	42	540	2,43	1312,2
Tándem 2	20,00	44	378	2,88	1088,64
Tándem 2	20,91	46	142	3,4	482,8
Tándem 2	21,82	48	90	3,98	358,2
Tándem 2	22,73	50	51	4,64	236,64
Tándem 2	23,64	52	44	5,38	236,72
Tándem 2	24,55	54	13	6,22	80,86
Tándem 2	25,45	56	12	7,2	86,4
Tándem 2	26,36	58	11	8,2	90,2

Continuación.

Tándem 2	27,27	60	3	9,4	28,2
Tándem 2	28,18	62	1	10,7	10,7
Tándem 2	29,09	64	3	12,2	36,6
Tándem 2	30,91	68	1	15,6	15,6
Tándem 2	33,64	74	1	22,2	22,2

Tabla 3.17: Factor Camión T3-S2

Fuente: Propia

$$FC_{T3-S2} = \frac{\sum ESAL}{\text{NUMERO DE VEHICULOS}} = \frac{61979,8037}{29605} = 2.09$$

Ecuación 3.7: Determinación de factor camión T3-S2

Registro de vehículos T3-S2-R4

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	4,55	10	80	0,102	8,16
Direccional	5,45	12	84	0,213	17,892
Tándem 1	8,18	18	1	0,092	0,092
Tándem 1	9,09	20	1	0,141	0,141
Tándem 1	11,82	26	4	0,401	1,604
Tándem 1	12,73	28	6	0,534	3,204
Tándem 1	13,64	30	77	0,695	53,515
Tándem 1	14,55	32	55	0,887	48,785
Tándem 1	15,45	34	11	1,11	12,21
Tándem 1	16,36	36	4	1,38	5,52
Tándem 1	17,27	38	2	1,68	3,36
Tándem 1	18,18	40	1	2,03	2,03
Tándem 1	20,00	44	2	2,88	5,76
Tándem 2	8,18	18	1	0,141	0,141
Tándem 2	9,09	20	1	0,207	0,207
Tándem 2	10,91	24	1	0,401	0,401
Tándem 2	11,82	26	1	0,534	0,534
Tándem 2	12,73	28	26	0,695	18,07
Tándem 2	13,64	30	59	0,887	52,333

Continuación.

Tándem 2	14,55	32	36	1,11	39,96
Tándem 2	15,45	34	20	1,38	27,6
Tándem 2	16,36	36	2	1,68	3,36
Tándem 2	17,27	38	7	2,03	14,21
Tándem 2	18,18	40	2	2,43	4,86
Tándem 2	19,09	42	3	2,88	8,64
Tándem 2	20,00	44	1	3,4	3,4
Tándem 2	20,91	46	4	3,98	15,92
Arrastre 1	6,36	14	1	0,057	0,057
Arrastre 1	9,09	20	1	0,207	0,207
Arrastre 1	10,91	24	2	0,401	0,802
Arrastre 1	11,82	26	29	0,534	15,486
Arrastre 1	12,73	28	85	0,695	59,075
Arrastre 1	13,64	30	30	0,887	26,61
Arrastre 1	14,55	32	4	1,11	4,44
Arrastre 1	15,45	34	6	1,38	8,28
Arrastre 1	16,36	36	2	1,68	3,36
Arrastre 1	17,27	38	1	2,03	2,03
Arrastre 1	18,18	40	1	2,43	2,43
Arrastre 1	20,91	46	1	3,98	3,98
Arrastre 1	22,73	50	1	5,38	5,38
Arrastre 2	4,55	10	1	0,018	0,018
Arrastre 2	6,36	14	1	0,057	0,057
Arrastre 2	11,82	26	2	0,534	1,068
Arrastre 2	12,73	28	27	0,695	18,765
Arrastre 2	13,64	30	68	0,887	60,316
Arrastre 2	14,55	32	31	1,11	34,41
Arrastre 2	15,45	34	16	1,38	22,08
Arrastre 2	16,36	36	8	1,68	13,44
Arrastre 2	18,18	40	3	2,43	7,29
Arrastre 2	19,09	42	1	2,88	2,88
Arrastre 2	20,00	44	2	3,4	6,8
Arrastre 2	20,91	46	1	3,98	3,98
Arrastre 2	21,82	48	2	4,64	9,28
Arrastre 2	22,73	50	1	5,38	5,38

Tabla 3.18: Factor camión T3-S2-R4.

Fuente: Propia

$$FC_{T3-S2-R4} = \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{669.81}{164} = 4.08$$

Ecuación 3.8: Determinación de Factor Camión T3-S2-R4

Registro de vehículos T3-S3

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	0,91	2	5	0,0004	0,002
Direccional	3,64	8	53	0,041	2,173
Direccional	4,55	10	5025	0,102	512,55
Direccional	5,45	12	11178	0,213	2380,914
Direccional	6,36	14	615	0,388	238,62
Direccional	7,27	16	14	0,645	9,03
Direccional	8,18	18	5	1	5
Direccional	9,09	20	1	1,47	1,47
Direccional	10,91	24	1	2,89	2,89
Direccional	11,82	26	1	3,91	3,91
Direccional	14,55	32	1	8,8	8,8
Direccional	17,27	38	2	18,1	36,2
Tándem	1,82	4	6	0,0003	0,0018
Tándem	4,55	10	3	0,009	0,027
Tándem	5,45	12	22	0,018	0,396
Tándem	6,36	14	43	0,033	1,419
Tándem	7,27	16	66	0,057	3,762
Tándem	8,18	18	124	0,092	11,408
Tándem	9,09	20	156	0,141	21,996
Tándem	10,00	22	243	0,207	50,301
Tándem	10,91	24	232	0,292	67,744
Tándem	11,82	26	234	0,401	93,834
Tándem	12,73	28	351	0,534	187,434
Tándem	13,64	30	610	0,695	423,95
Tándem	14,55	32	1398	0,887	1240,026

Continuación

Tándem	15,45	34	4034	1,11	4477,74
Tándem	16,36	36	4610	1,38	6361,8
Tándem	17,27	38	3125	1,68	5250
Tándem	18,18	40	1154	2,03	2342,62
Tándem	19,09	42	272	2,43	660,96
Tándem	20,00	44	86	2,88	247,68
Tándem	20,91	46	50	3,4	170
Tándem	21,82	48	36	3,98	143,28
Tándem	22,73	50	23	4,64	106,72
Tándem	23,64	52	13	5,38	69,94
Tándem	24,55	54	5	6,22	31,1
Tándem	25,45	56	1	7,2	7,2
Tándem	26,36	58	2	8,2	16,4
Tándem	27,27	60	1	9,4	9,4
Tándem	29,09	64	1	12,2	12,2
Trídem	1,82	4	2	0,0001	0,0002
Trídem	2,73	6	1	0,0004	0,0004
Trídem	5,45	12	5	0,004	0,02
Trídem	6,36	14	12	0,008	0,096
Trídem	7,27	16	25	0,013	0,325
Trídem	8,18	18	79	0,021	1,659
Trídem	9,09	20	56	0,032	1,792
Trídem	10,00	22	44	0,048	2,112
Trídem	10,91	24	79	0,068	5,372
Trídem	11,82	26	81	0,095	7,695
Trídem	12,73	28	88	0,128	11,264
Trídem	13,64	30	94	0,17	15,98
Trídem	14,55	32	151	0,22	33,22
Trídem	15,45	34	269	0,281	75,589
Trídem	16,36	36	514	0,352	180,928
Trídem	17,27	38	1386	0,436	604,296
Trídem	18,18	40	2424	0,533	1291,992
Trídem	19,09	42	3381	0,644	2177,364
Trídem	20,00	44	4287	0,769	3296,703
Trídem	20,91	46	2508	0,911	2284,788
Trídem	21,82	48	753	1,069	804,957

Continuación.

Trídem	22,73	50	270	1,25	337,5
Trídem	23,64	52	105	1,44	151,2
Trídem	24,55	54	75	1,66	124,5
Trídem	25,45	56	60	1,9	114
Trídem	26,36	58	37	2,16	79,92
Trídem	27,27	60	26	2,44	63,44
Trídem	28,18	62	24	2,76	66,24
Trídem	29,09	64	17	3,1	52,7
Trídem	30,00	66	14	3,47	48,58
Trídem	30,91	68	12	3,88	46,56
Trídem	31,82	70	4	4,32	17,28
Trídem	32,73	72	3	4,8	14,4
Trídem	33,64	74	6	5,32	31,92
Trídem	34,55	76	2	5,88	11,76
Trídem	35,45	78	2	6,49	12,98
Trídem	36,36	80	1	7,15	7,15
Trídem	37,27	82	2	7,9	15,8
Trídem	38,18	84	1	8,6	8,6
Trídem	40,00	88	1	10,4	10,4

Tabla 3.19: Factor Camión T3-S3.

Fuente: Propia

$$FC_{T3-S3} \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{37221.9804}{16901} = 2.20$$

Ecuación 3.9: Determinación de Factor Camión T3-S3.

Registro de vehículos T3-S3-R2

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	4,55	10	5	0,102	0,51
Direccional	5,45	12	2	0,213	0,426
Tándem	8,18	18	1	0,092	0,092
Tándem	13,64	30	2	0,695	1,39
Tándem	14,55	32	2	0,887	1,774
Tándem	16,36	36	2	1,38	2,76
Trídem	6,36	14	1	0,008	0,008
Trídem	20,00	44	2	0,769	1,538
Trídem	21,82	48	2	1,069	2,138
Trídem	22,73	50	1	1,25	1,25
Trídem	23,64	52	1	1,44	1,44
Arrastre 1	6,36	14	1	0,388	0,388
Arrastre 1	7,27	16	1	0,645	0,645
Arrastre 1	13,64	30	1	6,8	6,8
Arrastre 1	15,45	34	3	11,3	33,9
Arrastre 1	16,36	36	1	14,4	14,4
Arrastre 2	6,36	14	1	0,388	0,388
Arrastre 2	7,27	16	1	0,645	0,645
Arrastre 2	17,27	38	2	18,1	36,2
Arrastre 2	18,18	40	1	22,5	22,5
Arrastre 2	19,09	42	2	27,8	55,6

Tabla 3.20: Factor camión T3-S3-R2

Fuente: Propia

$$FC_{T3-S3-R2} = \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{184,792}{7} = 26.40$$

Ecuación 3.20: Determinación de factor camión T3-S3-R2

Registro de vehículos T3-S2-R4

TIPO DE EJE	PESO (TON)	PESO (KIPS)	CANTIDAD DE VEHICULOS	LEF	ESAL'S
Direccional	3,64	8	1	0,041	0,041
Direccional	4,55	10	138	0,102	14,076
Direccional	5,45	12	169	0,213	35,997
Direccional	6,36	14	5	0,388	1,94
Tándem	10,91	24	1	0,292	0,292
Tándem	13,64	30	17	0,695	11,815
Tándem	14,55	32	43	0,887	38,141
Tándem	15,45	34	127	1,11	140,97
Tándem	16,36	36	68	1,38	93,84
Tándem	17,27	38	32	1,68	53,76
Tándem	18,18	40	10	2,03	20,3
Tándem	19,09	42	9	2,43	21,87
Tándem	20,00	44	3	2,88	8,64
Tándem	20,91	46	2	3,4	6,8
Tándem	25,45	56	1	7,2	7,2
Trídem	12,73	28	2	0,128	0,256
Trídem	13,64	30	2	0,17	0,34
Trídem	14,55	32	1	0,22	0,22
Trídem	17,27	38	2	0,436	0,872
Trídem	18,18	40	17	0,533	9,061
Trídem	19,09	42	57	0,644	36,708
Trídem	20,00	44	87	0,769	66,903
Trídem	20,91	46	65	0,911	59,215
Trídem	21,82	48	51	1,069	54,519
Trídem	22,73	50	11	1,25	13,75
Trídem	23,64	52	6	1,44	8,64
Trídem	24,55	54	1	1,66	1,66
Trídem	25,45	56	1	1,9	1,9
Trídem	26,36	58	4	2,16	8,64
Trídem	27,27	60	4	2,44	9,76
Trídem	30,91	68	1	3,88	3,88
Trídem	31,82	70	1	4,32	4,32
Arrastre 1	7,27	16	1	0,057	0,057

Continuación.

Arrastre 1	10,00	22	2	0,207	0,414
Arrastre 1	10,91	24	5	0,292	1,46
Arrastre 1	11,82	26	1	0,401	0,401
Arrastre 1	12,73	28	26	0,534	13,884
Arrastre 1	13,64	30	98	0,695	68,11
Arrastre 1	14,55	32	107	0,887	94,909
Arrastre 1	15,45	34	40	1,11	44,4
Arrastre 1	16,36	36	23	1,38	31,74
Arrastre 1	17,27	38	7	1,68	11,76
Arrastre 1	18,18	40	1	2,03	2,03
Arrastre 1	20,91	46	2	3,4	6,8
Arrastre 2	10,91	24	2	0,292	0,584
Arrastre 2	11,82	26	1	0,401	0,401
Arrastre 2	12,73	28	2	0,534	1,068
Arrastre 2	13,64	30	5	0,695	3,475
Arrastre 2	14,55	32	3	0,887	2,661
Arrastre 2	15,45	34	4	1,11	4,44
Arrastre 2	16,36	36	2	1,38	2,76
Arrastre 2	17,27	38	5	1,68	8,4
Arrastre 2	18,18	40	21	2,03	42,63
Arrastre 2	19,09	42	59	2,43	143,37
Arrastre 2	20,00	44	97	2,88	279,36
Arrastre 2	20,91	46	74	3,4	251,6
Arrastre 2	21,82	48	25	3,98	99,5
Arrastre 2	22,73	50	11	4,64	51,04
Arrastre 2	23,64	52	1	5,38	5,38
Arrastre 2	24,55	54	1	6,22	6,22

Tabla 3.21: Factor camión T3-S3-R4

Fuente: Propia

$$FC_{T3-S3-R4} = \sum \frac{ESAL}{NUMERO DE VEHICULOS} = \frac{1903.58}{313} = 6.08$$

Ecuación 3.21: Determinación de Factor Camión T3-S3-R4

TABLA RESUMEN DE FACTORES CAMION PARA EL SALVADOR.

TIPO DE VEHICULO	FACTOR CAMION
C-2	3,04
C-2 ^a	0,36
C-3	2,15
C-4	0,88
T2-S2	1,94
T3-S1	2,81
T3-S2	2,09
T3-S2-R4	4,08
T3-S3	2,20
T3-S3-R2	26,40
T3-S3-R4	6,08

Tabla 3.22: Resumen de factores camión

Fuente: Propia

**CAPITULO IV:
ANALISIS COMPARATIVO
PARA DISEÑO DE
PAVIMENTOS MEDIANTE
LAS ALTERNATIVAS IMT-
PAVE Y CR-ME Y EL
METODO AASHTO 93.**

4.1- DISEÑO PROPUESTO POR METODO AASHTO 93.

Como objetivo de la investigación se pretende revisar una estructura de pavimento, desarrollada por el método AASHTO 93, incorporando las variantes que cada análisis en particular exija para su diseño. Se muestra la captura de un diseño desarrollado en el software WinPAS.

WinPAS
Pavement Thickness Design According to
1993 AASHTO Guide for Design of Pavements Structures
American Concrete Pavement Association

Flexible Design Inputs

Agency: _____
Company: CONSULTA S.A DE C.V
Contractor: _____
Project Description: Mejoramiento de la Red Vial de la Zona Norte de El Salvador.
Location: VP- 07

Flexible Pavement Design/Evaluation

Structural Number	3.78	Soil Resilient Modulus	12,391.80 psi
Design ESALS	6,726,672	Initial Serviceability	3.47
Reliability	80.00 percent	Terminal Serviceability	2.00
Overall Deviation	0.45		

Layer Pavement Design/Evaluation

Layer Material	Layer Coefficient	Drainage Coefficient	Layer Thickness	Layer SN
Asphalt Cement Concrete	0.43	1.00	3.94	1.69
Graded Stone Base	0.13	1.10	7.87	1.13
Granular Subbase	0.11	1.10	7.87	0.95
	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	0.00	0.00	0.00
			3 SN	3.77

Figura 4.1: Diseño de espesores método AASHTO 93.

Para tal diseño se tienen los espesores mostrados, así como el valor de soporte CBR, usado para su diseño.

CAPA	ESPESOR(cm)	CBR (%)
carpeta	10	
base	20	80
subbase	20	30
subrasante	Infinito	15

Tabla 4.1: Espesores y valores de CBR, para diseño.

4.2 MODULOS ELASTICOS PARA DISEÑOS POR ALTERNATIVAS MECANICISTA-EMPIRICAS.

4.2.1 MODULO DINAMICO PARA LA CARPETA ASFALTICA

Como resultado de pruebas de laboratorio, por medio del ensayo de resistencia a la tensión indirecta, para lo cual se elaboraron briquetas Marshall, para un diseño de mezcla muy usual en nuestro país, con las temperaturas de 20°C, 40°C y 60°C.

Briqueta	Dprom (mm)	hprom (mm)	Temperatura (°C)	Módulo Dinámico (Mpa)
1	102.17	68.37	20	7170
2	101.93	68.07	20	11921
3	102.3	69.23	20	7233
4	102.17	68.03	40	3131
5	102.33	68.87	40	4377
6	102.03	69.4	40	6417
7	101.97	71.23	60	1488
8	102.03	68.93	60	2166
9	102.2	68	60	991

Tabla 4.2: resultados de ensayo de laboratorio.

Debido a que el Módulo Elástico de una mezcla asfáltica, cambia con la temperatura, se toma una temperatura de referencia, la cual sirve para construir curvas patrón de modulo elástico, se toma por defecto una temperatura $T = 70^{\circ}\text{F}$ (21°C) (Referencia: Guía AASTHO MEPDG). Además, Ricardo Bardasano González en su artículo sobre: *Mezclas bituminosas, Módulo Elástico, Shell*, nos dice: “Dado que el módulo de las mezclas asfálticas depende en gran medida de la temperatura considerada, es necesario referir el mismo a una temperatura estándar para facilitar su aplicación generalizada. Habitualmente, la temperatura de referencia es de 20°C ”, además enfatiza que un error muy común en el diseño de pavimentos es tomar la temperatura ambiente del lugar, como temperatura para el cálculo de módulos elásticos. Tomando en consideración lo anterior, los módulos dinámicos a utilizar serán los realizados a 20°C de temperatura.

Tomando la media aritmética de los datos de módulo más confiables a 20°C.

$$\text{Módulo Elástico}(Mpa) = \frac{7170 + 7233}{2} = 7201.5 \text{ Mpa}$$

$$\text{Módulo Elástico}(Psi) = \frac{7201.5}{6.8975 \times 10^{-3}} = 1,044,073 \text{ Psi}$$

4.2.2 MODULOS RESILIENTES PARA DISEÑO POR ALTERNATIVAS MECANICISTA-EMPIRICAS.

4.2.2.1 FORMULAS PARA CORRELACION ENTRE CBR Y MR

Existen varias fórmulas las cuales han sido deducidas en base a experiencia y prácticas de laboratorio de diferentes entidades, El uso de estas correlaciones genera incertidumbre ya que es muy complejo poder relacionar un valor de soporte CBR el cual cuantifica la resistencia de la capa, mientras que los módulos de Resiliencia, cuantifican la rigidez de la capa. La fórmula usada por la guía AASHTO MEPDG es la siguiente:

$$Mr = 2555CBR^{0.64} \text{ (psi)}$$

Ecuación 4.1: correlación Mr y CBR en psi

$$Mr = 18CBR^{0.64} \text{ (Mpa)}$$

Ecuación 4.2: correlación Mr y CBR en Mpa

Fuente: Transport and Road Research Laboratory (TRRL)

RESUMEN PROPIEDADES ELASTICAS

CAPA	CBR (%)	Módulo Resiliente (Mpa)	Módulo Resiliente (psi)	Módulos de Poisson (promedio)
carpeta	-----	7201.5	1,044,073	0.32
base	80	297.34	42205.0	0.35
subbase	30	158.72	22529.34	0.35
subrasante	15	101.85	14457.37	0.35

Tabla 4.3: Estructura del pavimento

4.3 DATOS DE TRANSITO PARA DISEÑO

En los datos de tránsito son tomados en cuenta solo el tráfico pesado, sabiendo que son los que generan el mayor daño a la estructura del pavimento, sin embargo existe una gran cantidad de tráfico liviano. Sin embargo la Guía de diseño MEPDG, propone un diseño en el cual se toman en cuenta solo el tráfico pesado. Los factores camión fueron calculados con registros de diferentes estaciones de pesaje para El Salvador.

VEHICULO	CANTIDAD	PORCENTAJE (%)	FACTOR CAMION
C-2	203.00	39.57	3.04
C-2 ^a	40.00	7.80	0.36
C-3	20.00	3.90	2.15
T2-S2	8.00	1.56	1.94
T3-S2	187.00	36.45	2.09
T3-S3	55.00	10.72	2.2
TPDA	513	100.00	

Tabla 4.4: Datos de tráfico pesado.

4.4 EVALUACION DE DISEÑO POR ALTERNATIVA IMT-PAVE.

4.4.1 ENTRADA DE DATOS

4.4.1.1 TRANSITO

TRÁNSITO

TDPA (veh/día)

FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR:

SENTIDO (FDS) =

CARRIL (FDC) =

HORIZONTE DE PROYECTO

Vida (años) =

Tasa crecimiento (%) =

Volumen de tránsito para el horizonte de proyecto

	Porcentaje representativo %	Num de repeticiones promedio [Ejes/Año]
SENCILLO	40.3	123,821
DUAL	19.4	59,584
TANDEM	35.9	110,086
TRIDEM	4.4	13,484

CLASIFICACIÓN VEHICULAR (%)

A	<input type="text" value="0"/>	
B2	<input type="text" value="7.8"/>	
B3	<input type="text" value="0"/>	
C2	<input type="text" value="39.57"/>	
C3	<input type="text" value="3.9"/>	
T3-S2	<input type="text" value="36.45"/>	
T3-S3	<input type="text" value="10.72"/>	
T3-S2-R4	<input type="text" value="0"/>	
Otros	<input type="text" value="1.56"/>	
Suma	<input type="text" value="100.0"/>	

Figura 4.2: Introducción de tránsito al IMT-PAVE 1.2

Introducción de datos de tránsito para el proyecto específico, el estudio de tránsito usado corresponde, solo a la fracción de tránsito pesado.

4.4.1.2 GENERACIÓN DE ESPECTROS DE CARGA DEBIDO AL TRÁNSITO

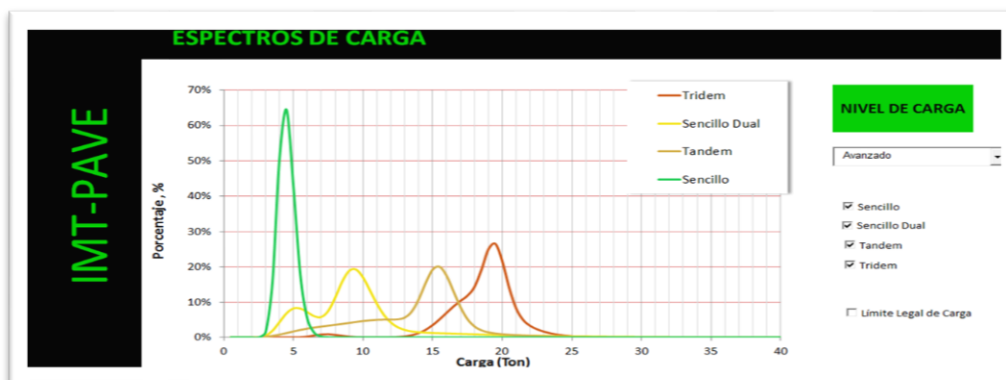


Figura 4.3: Generación de espectros de carga IMT-PAVE 1.2

Se procede a la creación de espectros de carga, en este caso para toda la flota vehicular pesada registrada en las respectivas básculas en El Salvador, los cuales se muestran en la siguiente figura.

4.4.1.3 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

No. Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Modulo (MPa)
1	CARPETA	10	7201.5
2	base	20	297.34
3	subbase	20	158.72
4	subrasante		101.85
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Figura 4.4: Análisis Espectral IMT-PAVE 1.2

Se pretende tener una vida por fatiga y por deformación permanente superior a los 20 años, que es el horizonte de proyecto, sin embargo esto no se alcanza, por lo que se propondrá una

nueva configuración de capas. Ya que los espesores propuestos anteriormente no cumplen con los requerimientos de fatiga y deformación permanente.

4.5 PROPUESTA DE DISEÑO POR ALTERNATIVA IMT-PAVE

Realizando diferentes iteraciones, se tiene la siguiente tabla de resultados, de la cual se eligió el diseño que se encuentra resaltado por considerarse, que tiene un menor espesor de carpeta y mayor espesor de base, lo que se ve reflejado positivamente en términos económicos.

Carpeta asfáltica (cm)	Base (cm)	Subbbase (cm)	Vida remanente	
			fatiga	Deformación permanente
10	20	20	10.8	3.3
10	20	40	10.8	17.9
12	20	40	>20	>20
12	20	30	>20	12.8
12	25	30	>20	18.8
12	25	35	>20	>20
10	30	40	10.8	>20
15	30	40	>20	>20
15	20	30	>20	>20
15	20	25	>20	>20

Tabla 4.5: Resultados de Iteraciones en IMT-PAVE.

PROPUESTA DE DISEÑO POR METODOLOGIA IMT-PAVE.

IMT-PAVE

ANÁLISIS ESPECTRAL

Numero de capas:

4

ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO			
No. Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	CARPETA	12	7201.5
2	base	20	297.34
3	subbase	40	158.72
4	subrasante		101.85
5			
6			
7			
8			
9			
10			

MODELO DE DETERIORO

FATIGA: IMT

DEFORMACIÓN PERMANENTE: IMT

Análisis Espectral

vida por fatiga (años)

> 20

vida por deformación (años)

> 20

Espectros Daño Deformación

Espectros Daño Fatiga

Daño Acumulado Deformación

Daño Acumulado Fatiga

Figura 4.6: análisis espectral, IMT-PAVE. (Propuesta)

4.5.1 ESPECTROS DE RESPUESTA

El IMT-PAVE muestra los datos en formas de gráficos que muestran el desempeño a lo largo de la vida del proyecto, los cuales se muestran en las siguientes figuras.

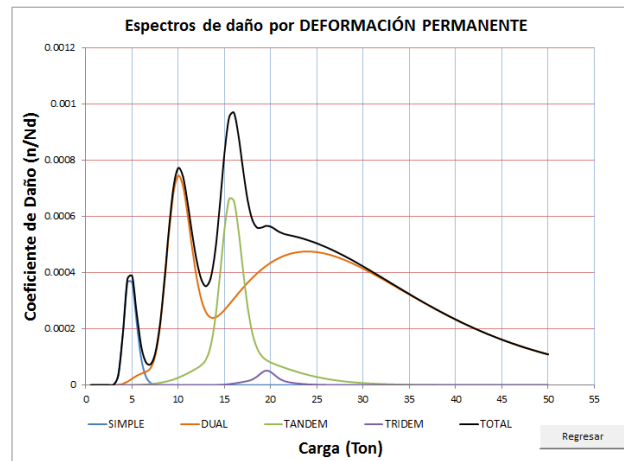


Figura 4.7: Espectro de daño por deformación permanente.

El espectro de daño por deformación permanente, se muestra que el mayor coeficiente de daño se encuentra para los ejes duales.

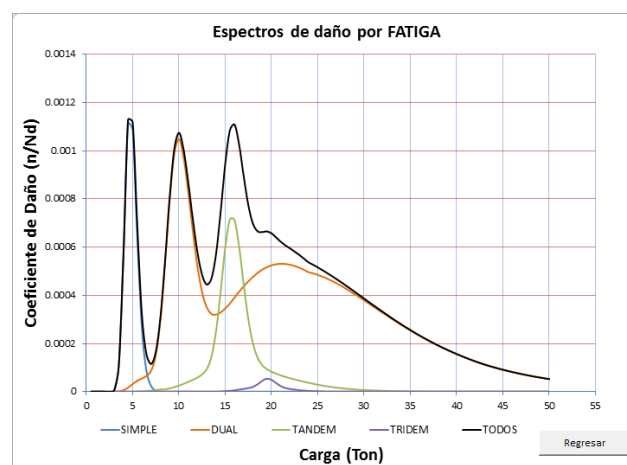


Figura 4.8: Espectro de daño por fatiga.

Para la condición de fatiga el mayor daño se debe a los ejes simples

Las siguientes gráficas muestran la forma de distribución del daño a lo largo del tiempo, de vida de la estructura.

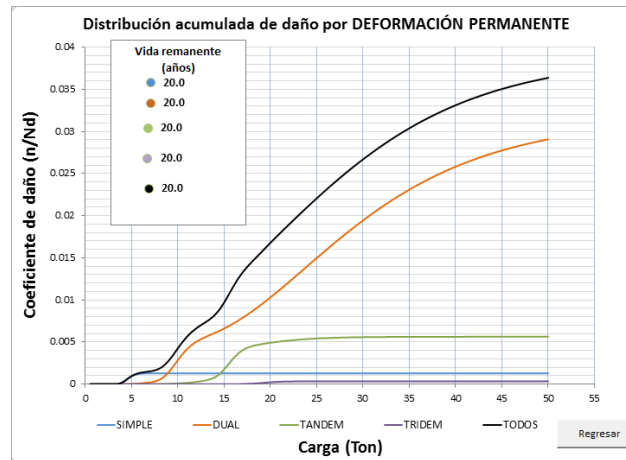


Figura 4.9: Distribución acumulada de daño por deformación permanente.

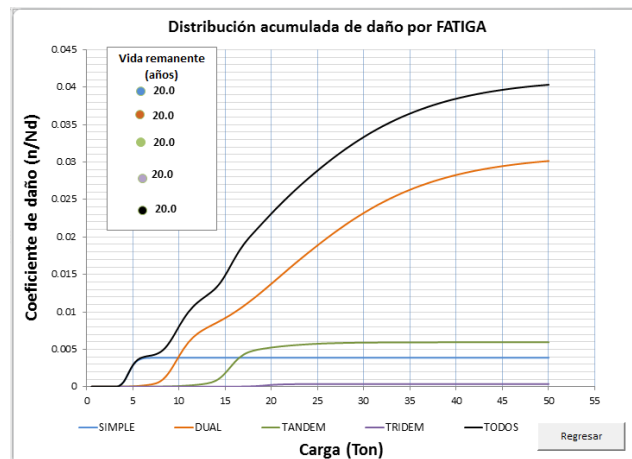


Figura 4.10: Distribución acumulada de daño por fatiga.

4.6 EVALUACION DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME

4.6.1 REVISIÓN SIN REALIZAR ANÁLISIS CLIMÁTICO

Para este caso no realizaremos análisis climático, y los valores para el módulo dinámico de la carpeta y los módulos resilientes de las capas granulares, serán introducidos puntualmente.

4.6.1.1 TIPO DE ANÁLISIS

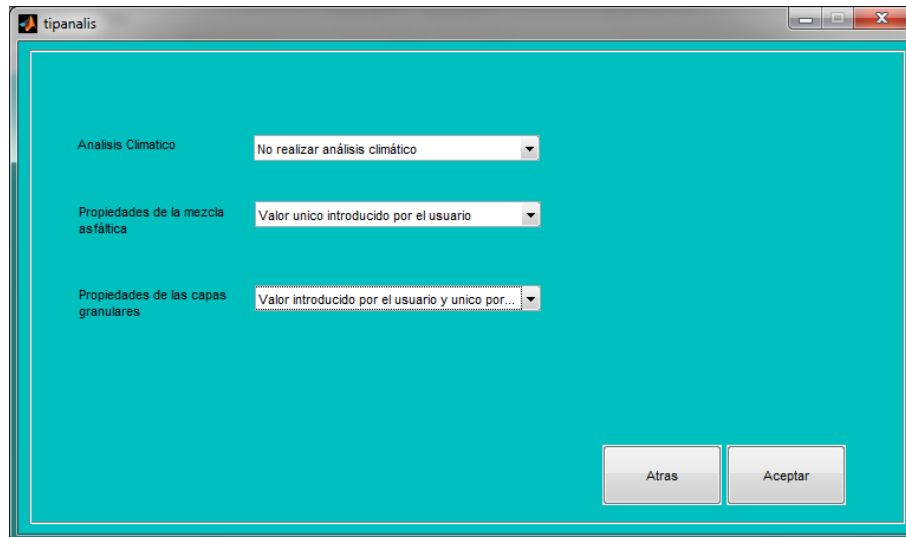


Figura 4.11: Elección del tipo de análisis, (revisión, No realizar análisis climático)

4.6.1.2 ENTRADA DE DATOS: Estructura del pavimento

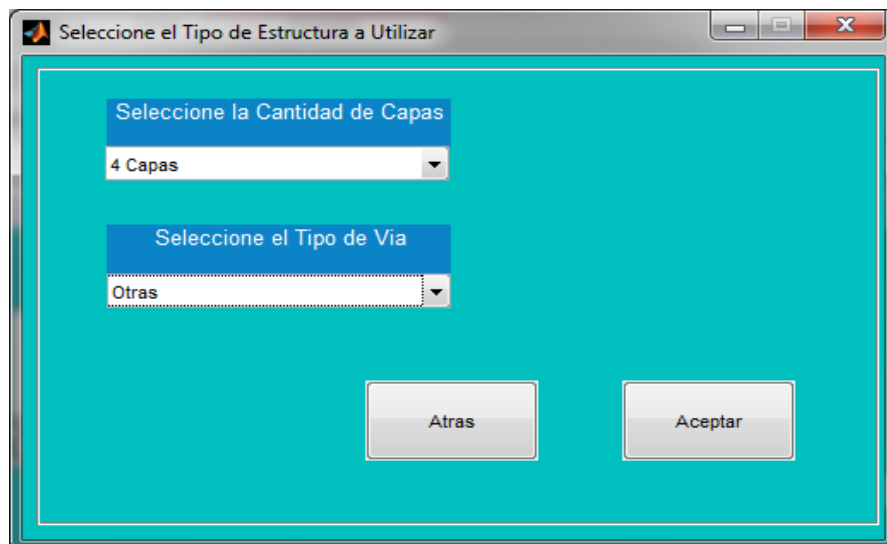


Figura 4.12: elección de la cantidad de capas y tipo de vía.

Para la elección del tipo de pavimento en nuestro país elegimos el tipo de carretera “otras”, ya que este es un parámetro el cual proviene de los Estados Unidos, en donde una carretera

interestatal, así como primaria, que son las otras opciones por las que nos podemos inclinar, no es el caso de este diseño, o para la mayoría de diseños en El Salvador.

Propiedades de la Estructura del Pavimento

Parametros de la Estructura del Pavimento

Estructura del Pavimento	Espesor (in)	Modulo Resiliente (psi)	Razon de Poisson
Carpeta Asfaltica	4	1044073	0.32
Base	8	42205.4	0.35
Subbase	8	22529.34	0.35
Subrasante		14457.37	0.35

Profundidad hasta estrato rocoso (in)

60

Atras Aceptar

Figura 4.13: parámetros de la estructura del Pavimento.

DATOS DE TRANSITO.

Para la introducción del tránsito se empieza por la introducción de la presión de inflado para vehículos pesados.

gatejes

Propiedades del Trafico

Presion de Inflado (psi) 110

Configuracion de Ejes Editar

Atras Aceptar

Figura 4.14: introducción de propiedades del tráfico.

Existen dos formas de introducción del tránsito, la primera por su número de ESAL's, introduciéndolo manualmente, y también introduciendo los datos necesarios para que el software lo calcule, en este caso elegimos la segunda opción.

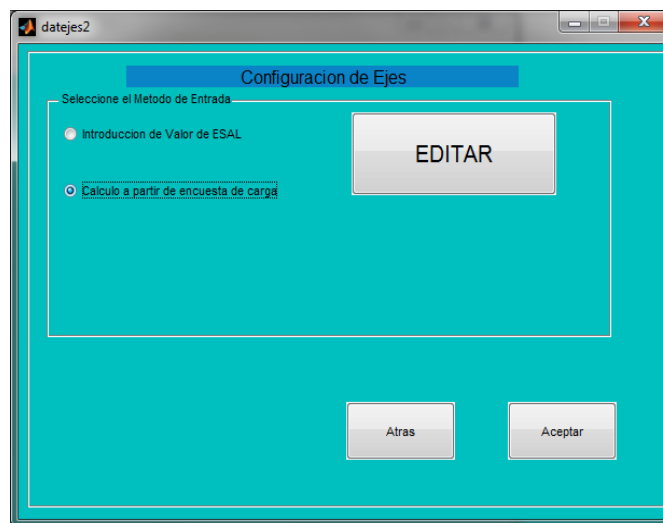


Figura 4.15: Configuración de ejes, cálculo a partir de encuesta de carga.

Los factores de carga a introducir son los que fueron calculados en el capítulo 3, de este proyecto, corresponde a datos de registro de tránsito reales para El Salvador.

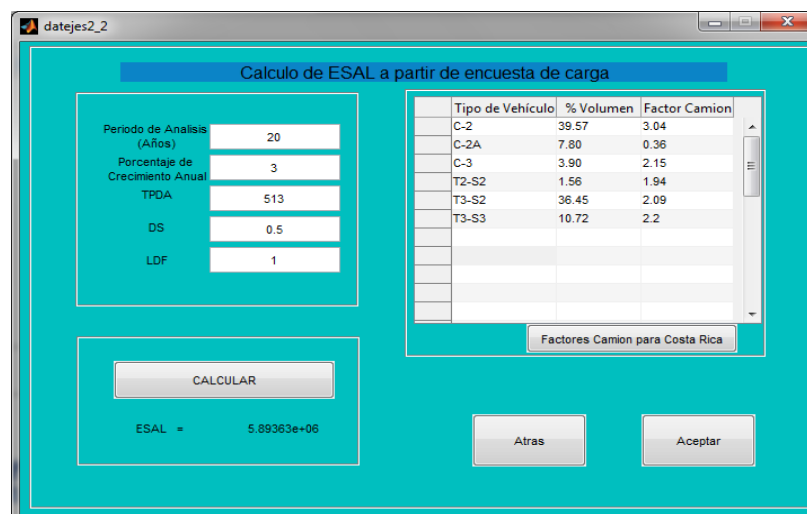


Figura 4.16: Cálculo de ESAL's a partir de encuesta de carga.

Figura 4.17: configuración de ejes.

RESPUESTAS DEL PAVIMENTO.

Para este propósito se usó la herramienta externa 3DMove, para su aplicación vea su anexo correspondiente.

Datos de salida de 3DMove.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	5.103	5.103	2	0.14545E+02	0.14544E+02	0.69950E+02
2	5.103	5.103	3.96	-0.19858E+03	-0.19930E+03	0.32774E+02
3	5.103	5.103	8	-0.16714E+03	-0.16739E+03	0.42331E+03
4	5.103	5.103	16	-0.13641E+03	-0.13648E+03	0.32286E+03
5	5.103	5.103	20.08	-0.12580E+03	-0.12584E+03	0.33059E+03

Tabla 4.5: datos de salida, deformaciones en 3dmove.

Los valores encontrados anteriormente están en unidades de micro-pulgadas, por lo que es necesaria la transformación a pulgadas para la introducción al CR-ME, lo cual se muestra en la siguiente tabla.

Point No	def ver (pulg)	def hor (pulg)
1	0.00006995	1.4545E-05
2	0.000032774	0.00019858
3	0.00042331	0.00016714
4	0.00032286	0.00013641
5	0.00033059	0.0001258

Tabla 4.6: Datos a introducir en el Módulo Respuestas del pavimento.

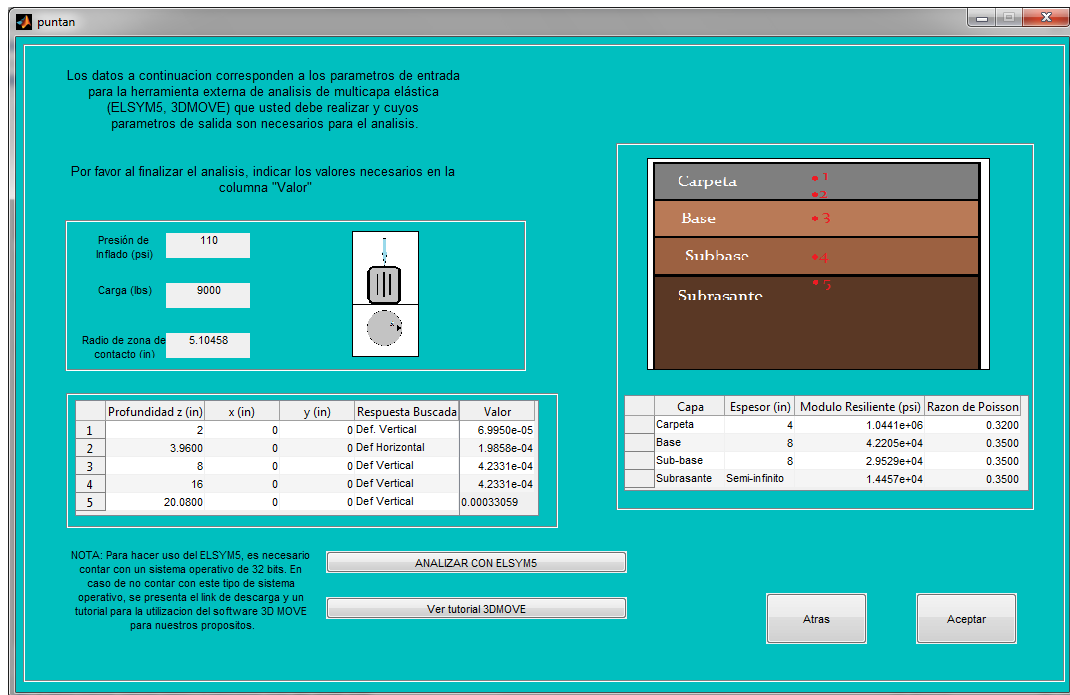


Figura 4.18: módulo de respuestas del pavimento.

ENTRADA: PARAMETROS DE FATIGA

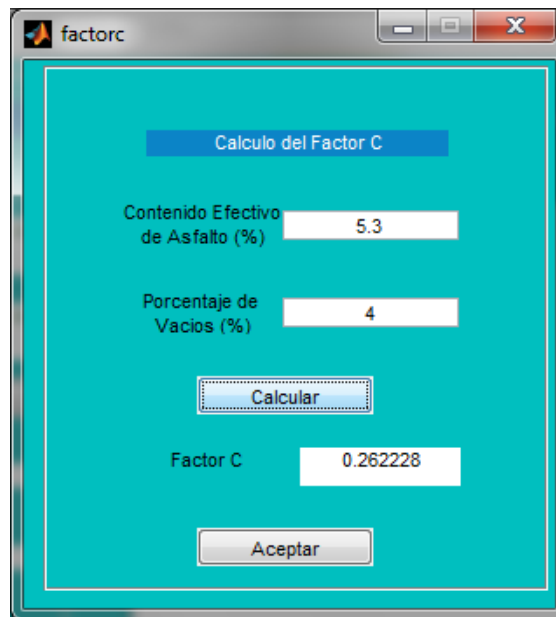


Figura 4.19: factor C de corrección para mezcla asfáltica.

La figura anterior muestra el cálculo de factor de corrección para la mezcla asfáltica.

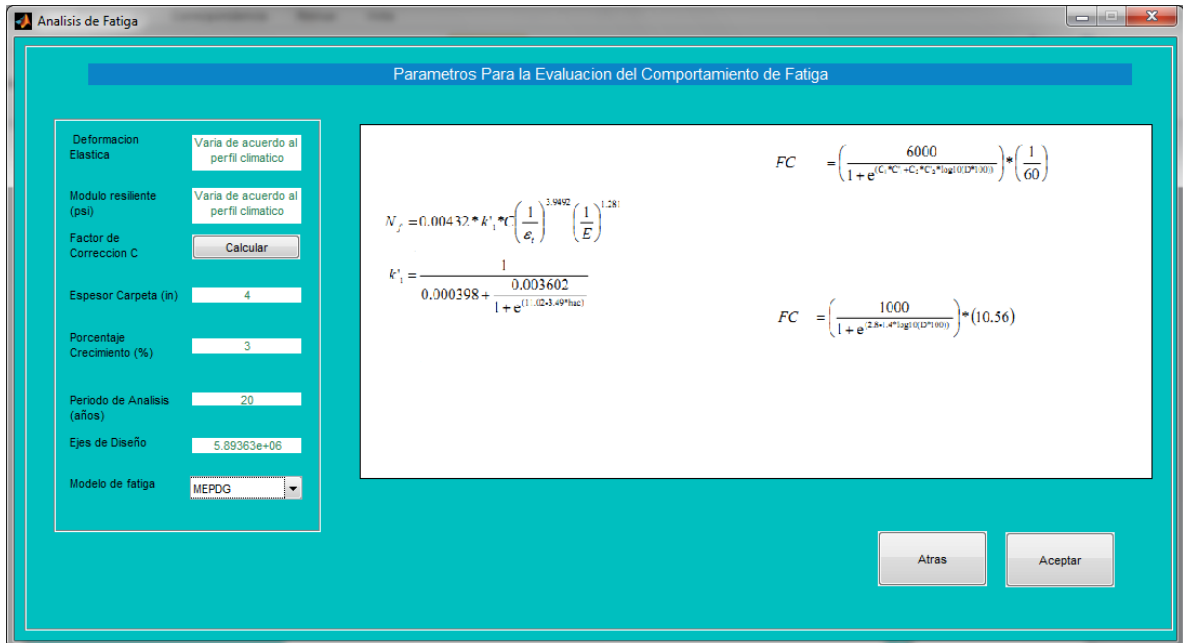


Figura 4.20: Parámetros para la evaluación del comportamiento de Fatiga.

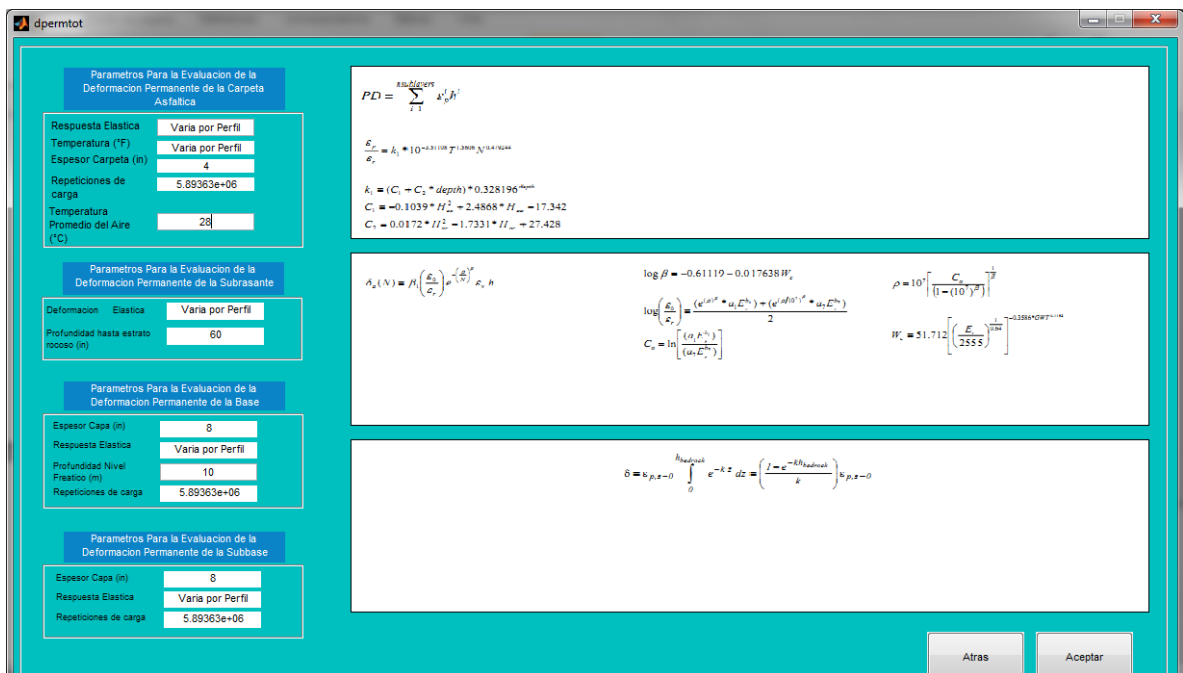


Figura 4.21: parámetros para la evaluación de deformación permanente.

4.6.1.3 RESULTADOS DE REVISION SIN CLIMA

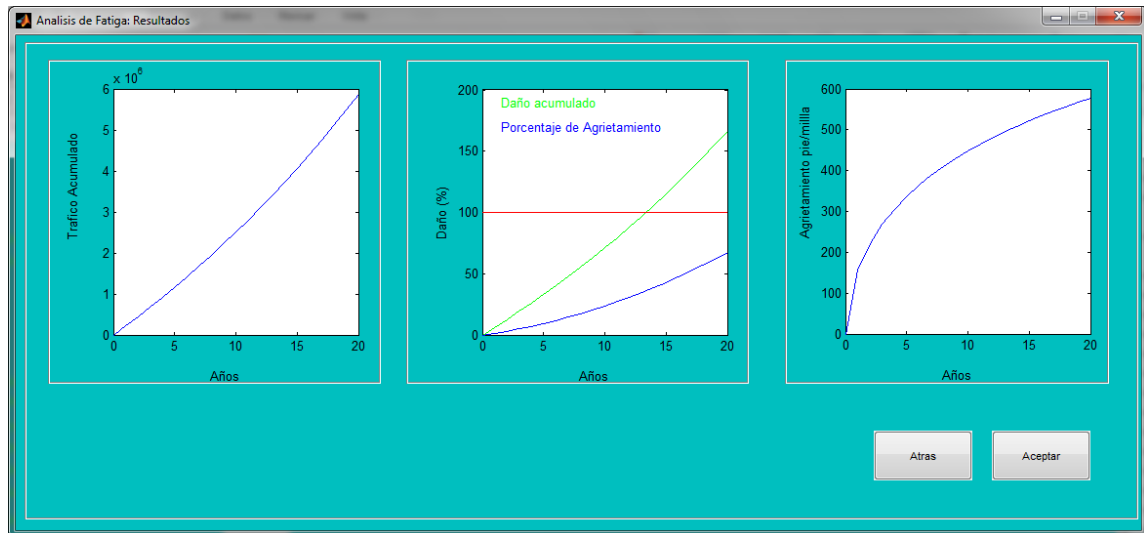


Figura 4.22: Análisis de fatiga

DEFORMACION PERMANENTE.

Criterios de los Estados Unidos para la revisión de deformación permanente.

1- Criterio de la Federal Highway Administración.

Severidad	Deformación D (pulg)
Baja	$0.25 < D < 0.5$
Media	$0.5 < D < 1$
Alta	$D > 1$

Tabla 4.7: Criterio de deformación de la Federal Highway Administration (FHWA)

2- Criterio de la AASHTO

Tipo de carretera	Deformación Máxima (pulg)
Interestatal	0.4
Primaria	0.5
Otras	0.65

Tabla 4.8: Criterio de deformación de la AASHTO

Figura 4.23: Evaluación de deformación permanente.

En conclusión la estructura de pavimento propuesta no cumple, para ninguna de las condiciones, fatiga ni deformación permanente.

4.6.2 PROPUESTA DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME, SIN ANALISIS CLIMATICO

Se realizaron distintas pruebas de diseño espesores, los cuales pueden verse detallados en la siguiente tabla resumen.

ESTRUCTURA			CONDICION: SIN ANALISIS CLIMATICO				
Carpeta Asfáltica (pulg)	base (pulg)	subbase (pulg)	Fatiga		Deformación perm (pulg)		
			Vida (años)	¿cumple fatiga?	Federal Highway Administration		AASHTO
					deformacion (pulg)	severidad	carretera OTRAS
4	8	8	14	no	0.939453	media	no cumple
4	8	10	14	no	0.927316	media	no cumple
5	8	10	>20	si	0.546771	media	Cumple

Tabla 4.9: propuestas de diseño por alternativa CR-ME, sin realizar análisis climático

En la tabla anterior se muestra un resumen, de varias pruebas de diseño, se puede observar que la tercera opción cumple con los dos requerimientos de fatiga y deformación permanente,

tomando como propuesta sin el efecto del clima, los espesores de 5 pulg de carpeta asfáltica, 8 pulgadas de base, y 10 pulgadas de subbase.

Propiedades de la Estructura del Pavimento

Parametros de la Estructura del Pavimento

Estructura del Pavimento	Espesor (in)	Modulo Resiliente (psi)	Razon de Poisson
Carpeta Asfáltica	5	1044.07	0.32
Base	8	42205.4	0.35
Subbase	10	29529.3	0.35
Subrasante		14457.4	0.35

Profundidad hasta estrato rocoso (m): 60

Atras Aceptar

Figura 4.24: Estructura de pavimento propuesta para alternativa CR-ME (sin análisis climático)

La figura anterior muestra la captura de la estructura que cumple con las condiciones de fatiga y deformación permanente.

RESULTADOS:

Fatiga

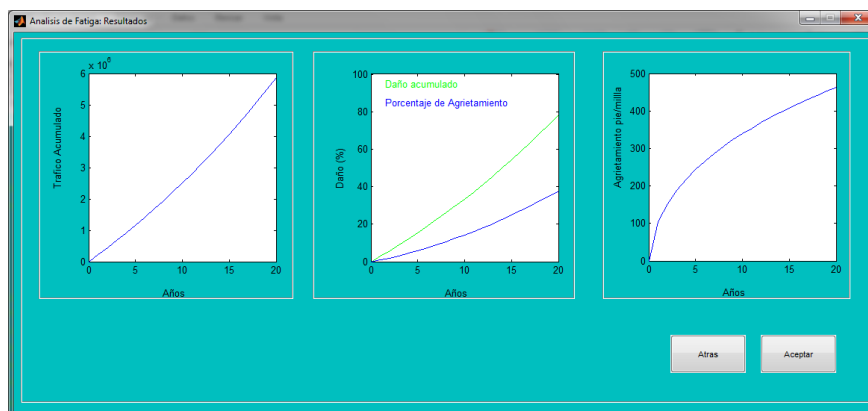


Figura 4.25: resultados de fatiga (propuesta sin clima)

En la figura anterior se puede observar que la en cuanto a fatiga es mayor a los 20 años, teniendo un porcentaje de agrietamiento menor al 40 %, y un daño acumulado de un 80 %, estos datos a los 20 años, que es la vida de diseño de la estructura del pavimento.

En la figura siguiente se puede observar los resultados para deformación permanente, la deformación máxima es menor a 0.65 pulgadas, lo cual es el límite para la estructura estudiada, por lo cual la estructura propuesta cumple con los requerimientos de fatiga y deformación permanente.

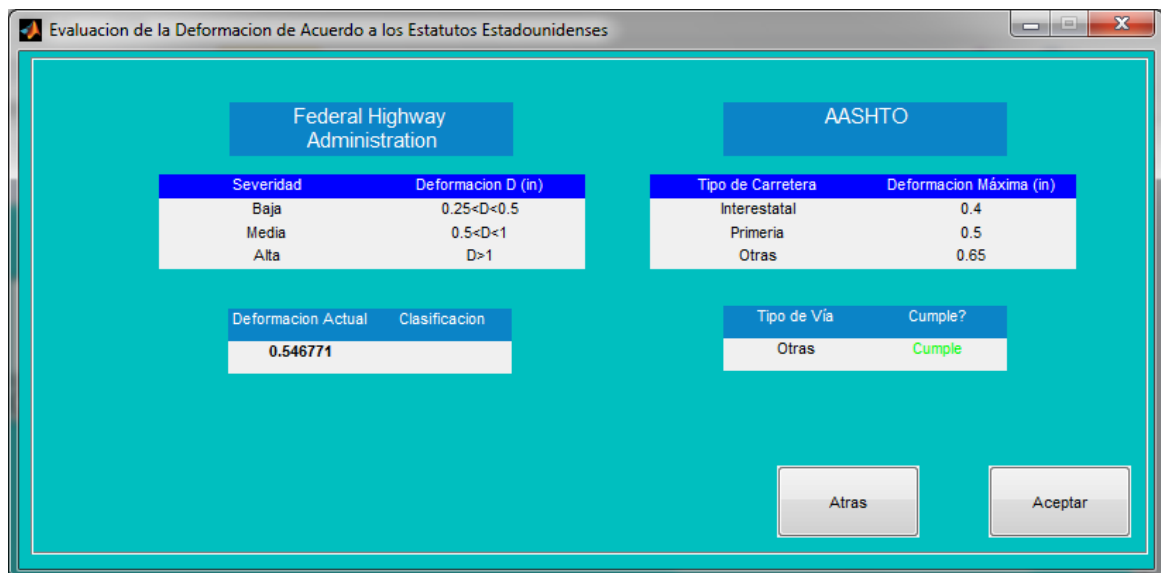


Figura 4.26: resultados para deformación permanente (propuesta sin clima)

4.6.3 PROPUESTAS DE DISEÑO POR ALTERNATIVA CR-ME, REALIZANDO ANALISIS CLIMATICO

Para este tipo de análisis es necesaria la introducción de datos de temperatura diaria para un año completo, con el objetivo de realizar perfiles climáticos, y así poder ver el efecto del clima en la estructura del pavimento.

Se realizaron distintas iteraciones, las cuales son mostradas en la siguiente tabla resumen.

ESTRUCTURA			CONDICION: ANALISIS CLIMATICO				
Carpeta Asfáltica (pulg)	base (pulg)	subbase (pulg)	Fatiga		Deformación perm (pulg)		AASHTO
			Vida (años)	¿cumple fatiga?	Federal Highway Administration		
					deformacion (pulg)	severidad	carretera OTRAS
5	8	10	>20	si	1.15544	alta	no cumple
6	10	12	>20	si	1.15442	alta	no cumple
7	12	14	>20	si	0.993627	media	no cumple
8	16	20	>20	si	0.947633	media	no cumple
10	18	20	>20	si	0.705911	media	no cumple
12	20	24	>20	si	0.637844	media	Cumple

Tabla 4.10: Propuestas de diseño por alternativa CR-ME, (con análisis climático)

La condición que se vuelve más crítica en este caso es la deformación permanente, como era de esperarse la vida por fatiga cumple con la vida de diseño, mayor a 20 años, y conforme aumentan los espesores de las capas el porcentaje de daño se vuelve menor.

La estructura que cumple con los requerimientos de fatiga y deformación permanente son los mostrados en la siguiente figura.

Propiedades de la Estructura del Pavimento

Parametros de la Estructura del Pavimento

Estructura del Pavimento	Espesor (in)	Modulo Resiliente (psi)	Razon de Poisson
Carpeta Asfaltica	12	1044.07	0.32
Base	20	42205.4	0.35
Subbase	24	29529.3	0.35
Subrasante		14457.4	0.35

Profundidad hasta estrato rocoso (in)

60

Atras Aceptar

Figura 4.27: Estructura de pavimento propuesta (con análisis climático)

De lo anterior puede concluirse que el mayor problema para nuestro país corresponde a la condición de análisis climático, especialmente para las deformaciones ya que no se logra alcanzar la condición de deformación baja, quedándose para este caso en una deformación media según criterio de la Federal Highway Administration. En las siguientes imágenes se muestra la captura de resultados, para una estructura de pavimento revisada, la cual cumplió para las condiciones sin análisis climático.

RESULTADOS DE DISEÑO CON ANÁLISIS CLIMÁTICO.

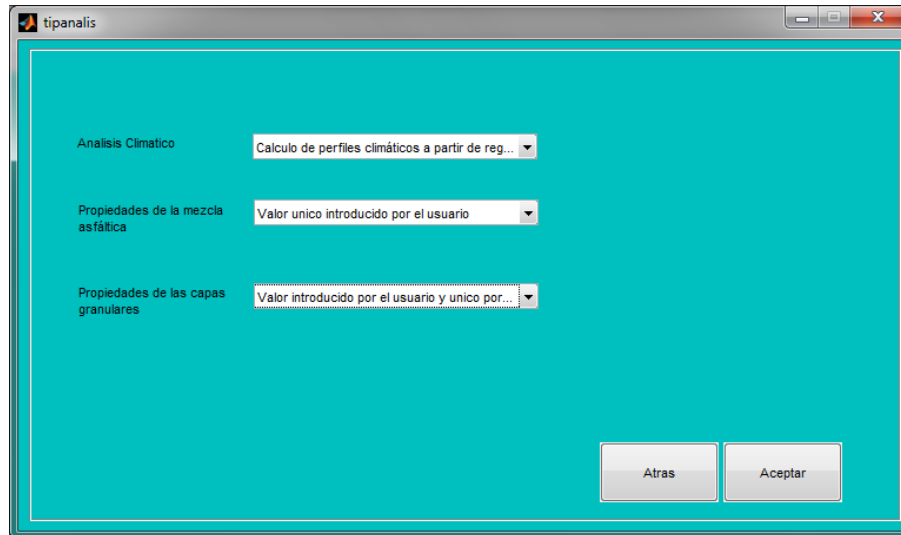


Figura 4.28: introducción del tipo de análisis

Nota: estructura del pavimento y tránsito corresponden a los mismos datos capturados anteriormente.

INTRODUCCION DE DATOS DEL CLIMA.

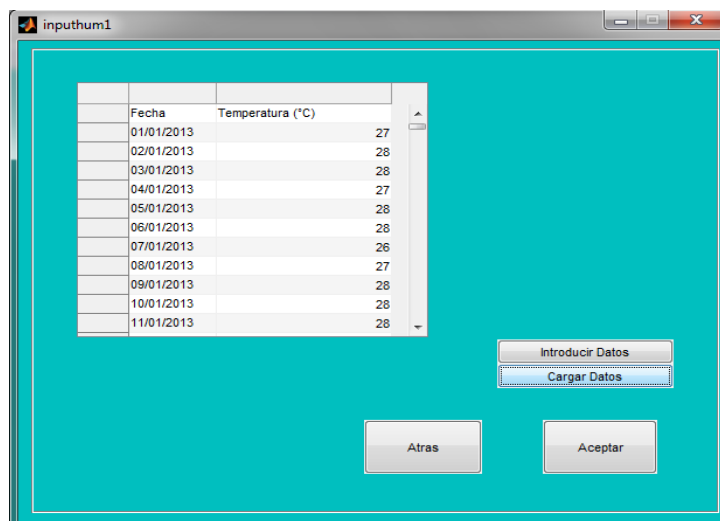


Figura 4.29: introducción de temperatura diaria anual.

Nota: Ver anexo (temperatura diaria para un año completo)

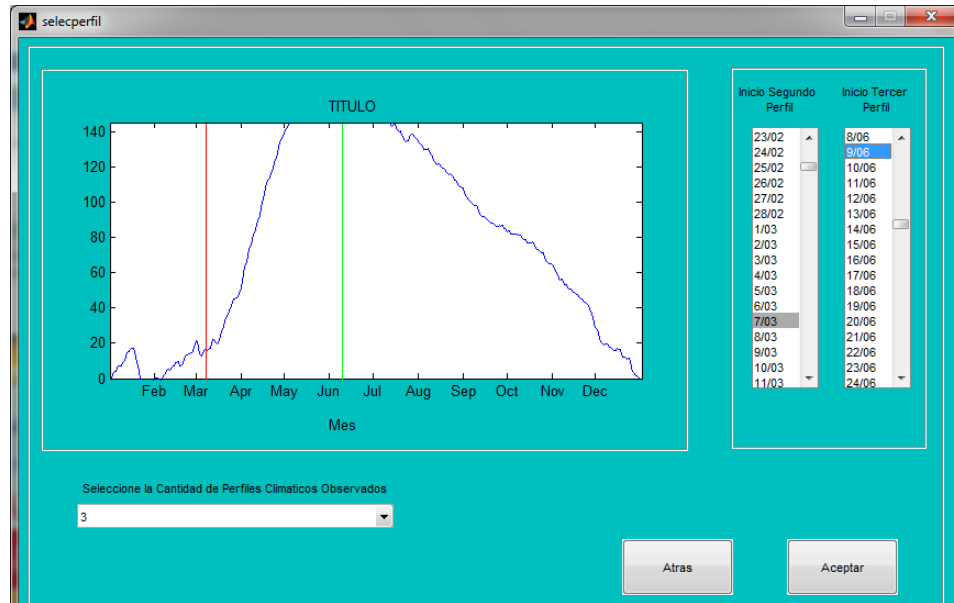


Figura 4.30: creación de perfiles climáticos.

Se pueden observar 3 perfiles climáticos, es decir donde se define claramente un cambio en la pendiente de la gráfica mostrada.

RESULTADOS.

FATIGA.

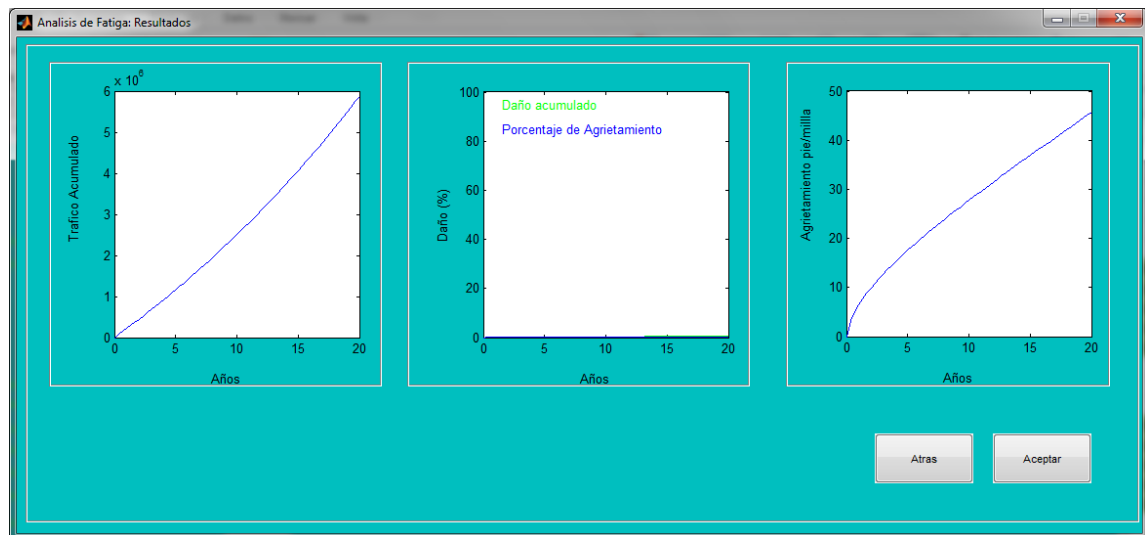


Figura 4.31: resultado debido a fatiga.

DEFORMACIÓN PERMANENTE.

Evaluacion de la Deformacion de Acuerdo a los Estatutos Estadounidenses

Federal Highway Administration

Severidad	Deformacion D (in)
Baja	$0.25 < D < 0.5$
Media	$0.5 < D < 1$
Alta	$D > 1$

AASHTO

Tipo de Carretera	Deformacion Máxima (in)
Interestatal	0.4
Primeria	0.5
Otras	0.65

Deformacion Actual	Clasificacion
0.637844	

Tipo de Vía	Cumple?
Otras	Cumple

Figura 4.32: Evaluación de la deformación permanente.

**CAPITULO V:
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES.**

5.1 CONCLUSIONES:

- 1- En base a los espectros de carga calculados para nuestro país, podemos concluir que se tiene un alto nivel de sobrecarga, pudiéndose observar porcentajes mayores al 20% en cada uno de ellos.
- 2- Los vehículos que más dañan nuestras carreteras, son los clasificados como: T3-S2-R2 y T2-S2-R2, sin embargo la proporción de estos es poca dentro del total de la flota vehicular.
- 3- Para la introducción de datos de tránsito en el diseño por las alternativas mecanicistas-empíricas, solo se considera el tráfico pesado, los que son tomados en cuenta en la metodología AASHTO MEPDG, en la cual se amparan las alternativas estudiadas.
- 4- En cuanto a espesores requeridos, puede concluirse que las metodologías basadas en conceptos mecanicistas, presentan diseños mucho más precisos, debido a que presentan una menor incertidumbre en los resultados, ya que se trata de una cuantificación más exhaustiva de los parámetros de diseño, teniendo para el caso del IMT-PAVE, una caracterización real en cuanto al tránsito, por lo que se tienen un enfoque más realista en términos de espectros de carga.
- 5- En cuanto al uso del CR-ME, la introducción de las deformaciones requeridas en puntos críticos de la estructura del pavimento, así como la introducción de los efectos del clima, hace que el análisis sea mucho más confiable, comparado con la metodología AASHTO 93. En cuanto a los datos del tránsito al igual que el método AASHTO 93, su entrada es en términos de número de ESAL's.
- 6- La utilización de los Espectros de Carga nos ayuda a que la caracterización del tránsito sea más representativo ya que estos se trabajan con los ejes originales de los vehículos (sencillo direccional, sencillo dual, tándem y trídem).

- 7- Para nuestro país la condición más crítica es deformación permanente, esto principalmente a las altas temperaturas, de acuerdo a la modelación por la alternativa CR-ME, en cuanto a la fatiga no presenta mucho problema, ya que las fallas que esperaríamos en nuestras carreteras, serán del tipo deformación permanente.

5.2 RECOMENDACIONES.

- 1- Realizar diseño de pavimentos utilizando cargas reales, mediante registros de pesaje, implementando el uso de básculas para conocer y controlar las cargas reales que transitan por las carreteras de nuestro país.

- 2- Buscar alternativas para el diseño de pavimentos flexibles en las que se puedan hacer el uso de factor climático ya que en nuestro país la metodología utilizada (AASHTO 93) no lo incorpora en el diseño, sabiendo que este tiene una gran influencia sobre la estructura del pavimento.

- 3- Hacerse del conocimiento de los métodos y las alternativas de diseño en pavimentos flexibles en las que ya se utiliza la metodología Mecanicista-Empírica, ya que en estas se realiza una mejor caracterización de los materiales (uso de los módulos elásticos), consideraciones reales del tránsito (pesos de los vehículos) y la utilización del factor climático (temperatura ambientales); para que los diseños que se realizan sean acorde a condiciones de la zona.

- 4- Hacer uso de las básculas para controlar la sobrecarga de los vehículos, para que este control nos permita disminuir el daño que recibe la estructura del pavimento debido a este factor.

- 5- Implementar recursos para la investigación y generación de Guías de Diseño mecanicistas propias de nuestro país, en el diseño de pavimentos en general, incluyendo cada tipología flexible, rígido y articulado, y sus diferentes variantes y/o combinaciones entre sí.

- 6 En cuanto a los estudios de los materiales el IMT-PAVE y el CR-ME necesitan de ensayos en los que se obtengan directamente los módulos elásticos, para cada una de las capas, ya que estas son alternativas Mecanicista-Empíricas, dejando de lado las correlaciones, ya que estas presentan incertidumbres.

- 7 Debido a que los mayores daños se deben a deformaciones, los cuales son generados principalmente por efecto de las capas granulares, es recomendable, exigir mayor calidad en dichos materiales exigiendo valores de Módulo Resiliente, más altos que los usados actualmente, de esta manera, se reduciría el daño por deformación.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES, AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS 1993 (Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO, 1993)

- ✓ Tesis Elementos Fundamentales para el Desarrollo de una Guía de Diseño de Pavimentos Empírico - Mecanística para Costa Rica. José Pablo Vargas Hernández, Universidad de Costa Rica

- ✓ Manual de Usuario, IMT-PAVE 1.1, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Paul Garnica Anguas, Roberto Hernández Domínguez, Documento Técnico N° 53, Sanfandila, Qro. 2013

- ✓ Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), Secretaria de Integración Económica Centroamericana (SIECA), Ing. Jorge Coronado Iturbide (Consultor), Noviembre de 2002

- ✓ Ingeniería de Carreteras, Alfonso Montejo Fonseca.
Bogotá- Colombia, 2002.

- ✓ Manual de Carreteras, Tomo I y Tomo II
Luis Bañón Blázquez, José F. Bevia García.

ANEXOS.

ANEXO A: DATOS DE TEMPERATURA PARA UN AÑO, ESTACION NUEVA CONCEPCION.

Fecha	Temp. (°C)	Fecha	Temp. (°C)	fecha	Temp. (°C)
01/01/2013	27	09/02/2013	27	20/03/2013	30
02/01/2013	28	10/02/2013	26	21/03/2013	28
03/01/2013	28	11/02/2013	27	22/03/2013	29
04/01/2013	27	12/02/2013	28	23/03/2013	28
05/01/2013	28	13/02/2013	27	24/03/2013	28
06/01/2013	28	14/02/2013	28	25/03/2013	30
07/01/2013	26	15/02/2013	27	26/03/2013	28
08/01/2013	27	16/02/2013	27	27/03/2013	27
09/01/2013	28	17/02/2013	24	28/03/2013	27
10/01/2013	28	18/02/2013	26	29/03/2013	27
11/01/2013	28	19/02/2013	28	30/03/2013	28
12/01/2013	29	20/02/2013	29	31/03/2013	30
13/01/2013	27	21/02/2013	28	01/04/2013	30
14/01/2013	28	22/02/2013	27	02/04/2013	31
15/01/2013	27	23/02/2013	27	03/04/2013	30
16/01/2013	26	24/02/2013	27	04/04/2013	29
17/01/2013	25	25/02/2013	27	05/04/2013	30
18/01/2013	23	26/02/2013	27	06/04/2013	30
19/01/2013	22	27/02/2013	29	07/04/2013	29
20/01/2013	23	28/02/2013	30	08/04/2013	30
21/01/2013	23	01/03/2013	26	09/04/2013	29
22/01/2013	25	02/03/2013	23	10/04/2013	29
23/01/2013	26	03/03/2013	23	11/04/2013	29
24/01/2013	26	04/03/2013	25	12/04/2013	29
25/01/2013	25	05/03/2013	28	13/04/2013	30
26/01/2013	25	06/03/2013	28	14/04/2013	30
27/01/2013	27	07/03/2013	27	15/04/2013	30
28/01/2013	28	08/03/2013	26	16/04/2013	31
29/01/2013	28	09/03/2013	27	17/04/2013	30
30/01/2013	27	10/03/2013	27	18/04/2013	29
31/01/2013	27	11/03/2013	29	19/04/2013	29
01/02/2013	27	12/03/2013	29	20/04/2013	27
02/02/2013	26	13/03/2013	26	21/04/2013	29

Continuación.

03/02/2013	25	14/03/2013	25	22/04/2013	29
04/02/2013	27	15/03/2013	26	23/04/2013	30
05/02/2013	27	16/03/2013	28	24/04/2013	28
06/02/2013	28	17/03/2013	29	25/04/2013	30
07/02/2013	28	18/03/2013	29	26/04/2013	30
08/02/2013	28	19/03/2013	29	27/04/2013	29
28/04/2013	29	08/06/2013	26	19/07/2013	27
29/04/2013	28	09/06/2013	28	20/07/2013	24
30/04/2013	28	10/06/2013	26	21/07/2013	25
01/05/2013	29	11/06/2013	25	22/07/2013	25
02/05/2013	27	12/06/2013	26	23/07/2013	26
03/05/2013	28	13/06/2013	26	24/07/2013	27
04/05/2013	29	14/06/2013	26	25/07/2013	28
05/05/2013	27	15/06/2013	27	26/07/2013	28
06/05/2013	28	16/06/2013	25	27/07/2013	27
07/05/2013	29	17/06/2013	27	28/07/2013	26
08/05/2013	28	18/06/2013	26	29/07/2013	25
09/05/2013	27	19/06/2013	26	30/07/2013	25
10/05/2013	28	20/06/2013	27	31/07/2013	26
11/05/2013	26	21/06/2013	25	01/08/2013	25
12/05/2013	27	22/06/2013	25	02/08/2013	26
13/05/2013	29	23/06/2013	27	03/08/2013	25
14/05/2013	28	24/06/2013	25	04/08/2013	25
15/05/2013	29	25/06/2013	25	05/08/2013	26
16/05/2013	28	26/06/2013	26	06/08/2013	27
17/05/2013	27	27/06/2013	26	07/08/2013	27
18/05/2013	27	28/06/2013	26	08/08/2013	25
19/05/2013	28	29/06/2013	26	09/08/2013	24
20/05/2013	26	30/06/2013	26	10/08/2013	26
21/05/2013	28	01/07/2013	25	11/08/2013	24
22/05/2013	27	02/07/2013	26	12/08/2013	25
23/05/2013	26	03/07/2013	26	13/08/2013	25
24/05/2013	25	04/07/2013	26	14/08/2013	27
25/05/2013	26	05/07/2013	26	15/08/2013	26
26/05/2013	26	06/07/2013	26	16/08/2013	25
27/05/2013	25	07/07/2013	27	17/08/2013	26
28/05/2013	25	08/07/2013	26	18/08/2013	26

Continuación.

29/05/2013	26	09/07/2013	27	19/08/2013	26
30/05/2013	27	10/07/2013	25	20/08/2013	25
31/05/2013	27	11/07/2013	25	21/08/2013	25
01/06/2013	27	12/07/2013	25	22/08/2013	27
02/06/2013	26	13/07/2013	25	23/08/2013	26
03/06/2013	27	14/07/2013	27	24/08/2013	25
04/06/2013	25	15/07/2013	27	25/08/2013	25
05/06/2013	27	16/07/2013	25	26/08/2013	26
06/06/2013	27	17/07/2013	25	27/08/2013	25
29/08/2013	26	08/10/2013	27	17/11/2013	26
30/08/2013	26	09/10/2013	26	18/11/2013	26
31/08/2013	26	10/10/2013	26	19/11/2013	25
01/09/2013	24	11/10/2013	25	20/11/2013	26
02/09/2013	25	12/10/2013	26	21/11/2013	26
03/09/2013	25	13/10/2013	26	22/11/2013	25
04/09/2013	25	14/10/2013	25	23/11/2013	26
05/09/2013	26	15/10/2013	26	24/11/2013	26
06/09/2013	25	16/10/2013	27	25/11/2013	25
07/09/2013	26	17/10/2013	26	26/11/2013	25
08/09/2013	26	18/10/2013	27	27/11/2013	25
09/09/2013	26	19/10/2013	25	28/11/2013	23
10/09/2013	26	20/10/2013	25	29/11/2013	23
11/09/2013	24	21/10/2013	25	30/11/2013	24
12/09/2013	24	22/10/2013	26	01/12/2013	25
13/09/2013	26	23/10/2013	26	02/12/2013	25
14/09/2013	26	24/10/2013	26	03/12/2013	24
15/09/2013	26	25/10/2013	26	04/12/2013	24
16/09/2013	26	26/10/2013	24	05/12/2013	25
17/09/2013	26	27/10/2013	25	06/12/2013	26
18/09/2013	25	28/10/2013	25	07/12/2013	27
19/09/2013	26	29/10/2013	26	08/12/2013	26
20/09/2013	26	30/10/2013	26	09/12/2013	26
21/09/2013	26	31/10/2013	26	10/12/2013	25
22/09/2013	26	01/11/2013	26	11/12/2013	26
23/09/2013	26	02/11/2013	25	12/12/2013	26
24/09/2013	26	03/11/2013	25	13/12/2013	26
25/09/2013	27	04/11/2013	24	14/12/2013	26

Continuación.

26/09/2013	26	05/11/2013	25	15/12/2013	28
27/09/2013	27	06/11/2013	25	16/12/2013	26
28/09/2013	25	07/11/2013	27	17/12/2013	26
29/09/2013	26	08/11/2013	25	18/12/2013	24
30/09/2013	25	09/11/2013	25	19/12/2013	25
01/10/2013	27	10/11/2013	26	20/12/2013	26
02/10/2013	26	11/11/2013	25	21/12/2013	26
03/10/2013	25	12/11/2013	26	22/12/2013	26
04/10/2013	26	13/11/2013	26	23/12/2013	27
05/10/2013	27	14/11/2013	26	24/12/2013	25
06/10/2013	26	15/11/2013	25	25/12/2013	22
07/10/2013	26	16/11/2013	26	26/12/2013	24
27/12/2013	26	28/12/2013	25	29/12/2013	26
30/12/2013	26	31/12/2013	26		

Tabla A-1: Temperatura diaria para el año 2013, proporcionada por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)

ANEXO B: ENSAYOS DE TENSION INDIRECTA.

En las siguientes páginas se anexan los ensayos tensión indirecta, a 20°C usados para el diseño, realizados en laboratorios de ASFALCA (Asfaltos de Centroamérica)

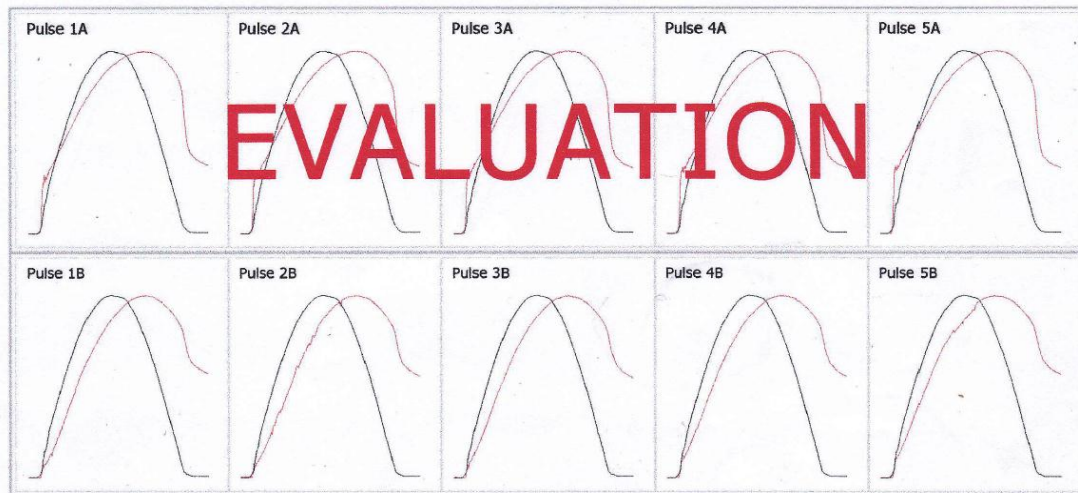
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test lun, 21 de jul de 2014 @ 03:17
 Report Number
 Operator palacios
 Specimen ID pdg 3
 Client Name

Lab Address El Salvador

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	69

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.689	4.688	4.691	4.690	4.691	4.690	5.741	5.741	5.741	5.742	5.743	5.741	5.216
Horizontal Stress (kPa)	421.5	421.4	421.6	421.6	421.6	421.6	516.1	516.1	516.0	516.2	516.2	516.1	468.8
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	7.08	7.08	7.08	7.08	7.08	7.08	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.63
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	125	125	125	125	125	125	125
Measured Stiffness (MPa)	5960	5936	5892	5867	5916	5914	8348	8211	8042	8119	8380	8220	7067
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	6099	6074	6027	6002	6052	6051	8547	8406	8232	8311	8578	8415	7233

Data File pdg_3_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:
 Bulk Density:
 Poisson's Ratio:
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed

Date

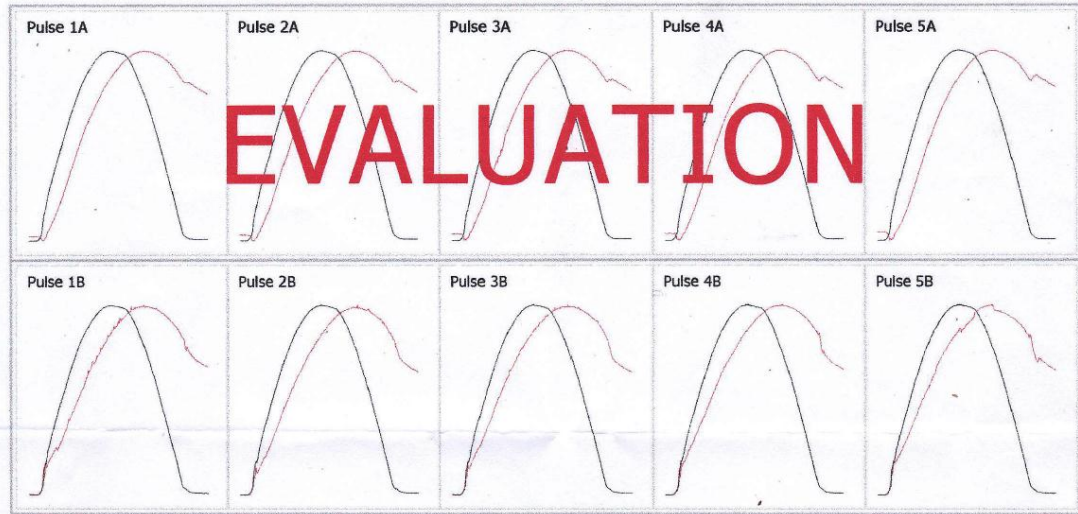
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test: lun, 21 de jul de 2014 @ 02:26
 Report Number:
 Operator: Majico
 Specimen ID: 1 tg ues
 Client Name:

Lab Address: El Salvador

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	68

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.927	4.929	4.929	4.928	4.928	4.928	4.585	4.586	4.586	4.585	4.584	4.585	4.757
Horizontal Stress (kPa)	448.7	448.9	448.9	448.8	448.8	448.8	417.6	417.6	417.6	417.5	417.4	417.6	433.2
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	6.29	6.29	6.29	6.29	6.29	6.29	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.66	5.98
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	124	124	124	124	124	124	125
Measured Stiffness (MPa)	7134	7194	7105	7078	6989	7100	7377	7153	6908	6677	6442	6911	7006
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	7300	7361	7268	7242	7150	7264	7555	7326	7071	6835	6593	7076	7170

Data File: 1 tg ues_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:
 Bulk Density:
 Poisson's Ratio:
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed: _____

Date: _____

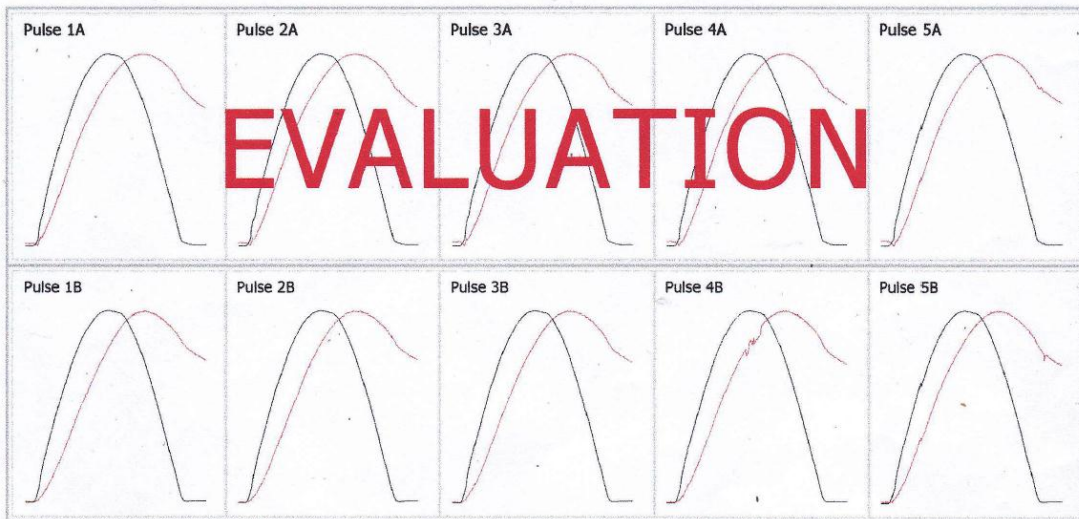
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test: lun, 21 de jul de 2014 @ 02:57
 Report Number: _____
 Operator: Arias
 Specimen ID: tdg2
 Client Name: _____

Lab Address: El Salvador

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	102
Thickness (mm)	68

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5



Test Results

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	7.554	7.552	7.554	7.555	7.553	7.554	5.403	5.404	5.405	5.405	5.406	5.405	6.479
Horizontal Stress (kPa)	693.1	693.0	693.1	693.2	693.0	693.1	495.8	495.8	495.9	495.9	496.0	495.9	594.5
Load-Area Factor	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63
Horizontal Deformation (um)	5.69	5.69	5.69	5.69	5.69	5.69	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	5.01
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Measured Stiffness (MPa)	12126	11834	11528	11281	10938	11541	11448	11221	11818	11994	12129	11722	11632
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	12414	12114	11797	11543	11193	11812	11747	11514	12128	12311	12448	12030	11921

Data File: tdg2_1.tdms

Notes: Record details about the specimen in this area:
 Bulk Density:
 Poisson's Ratio: 0.35
 Description of asphaltic material:
 How it was mixed:
 How it was compacted:
 How bulk density was determined:
 How the specimen was stored:

Signed: _____

Date: _____

ANEXO C: ANALISIS EN 3DMOVE.

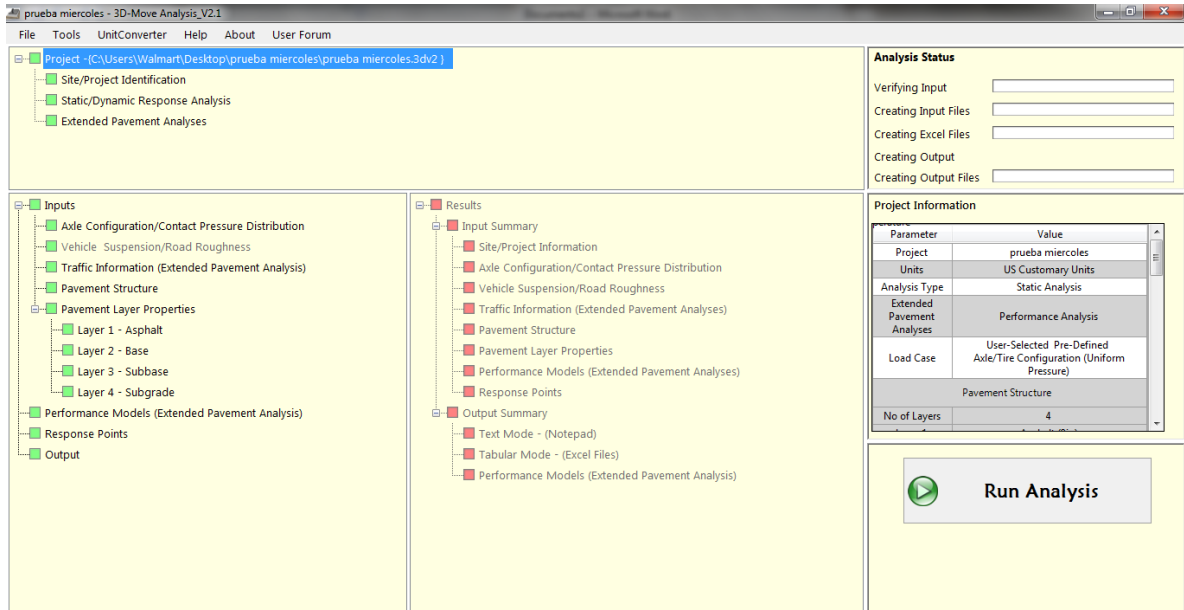


Figura C-1: Interfaz inicial de 3DMOVE.

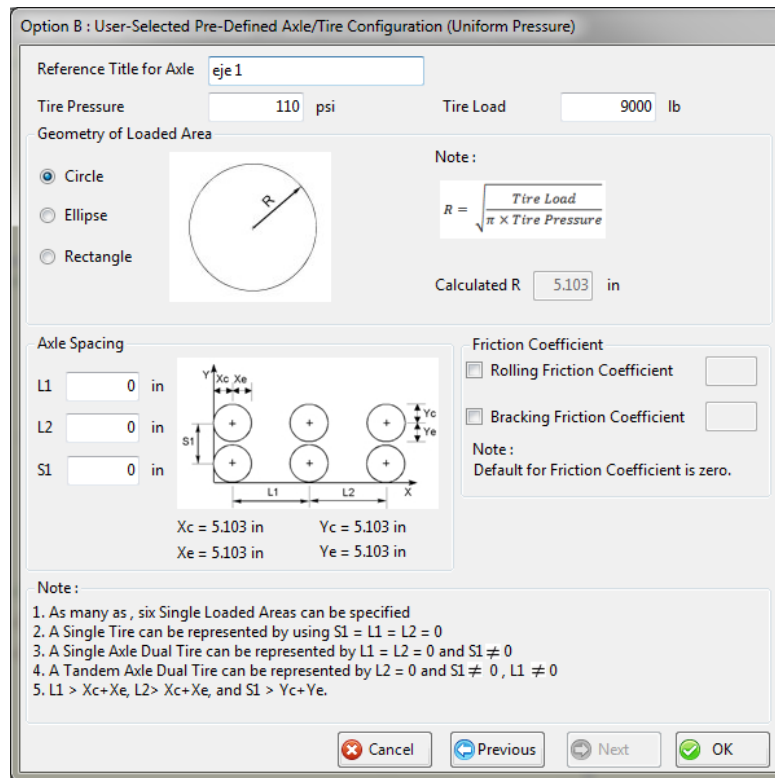


Figura C-2: Selección del tipo de carga.

Pavement Structure

Unit Converter : Length

Layer No	Layer Type	Material Charaterization	Thickness (in)
1	Asphalt	Linear Elastic	4
2	Base	Linear Elastic	8
3	Subbase	Linear Elastic	8
4	Subgrade	Linear Elastic	0

Note :
 -Layer No.1 represents the top/surface layer
 -For semi infinite depth, enter zero for last layer.

+ Add - Delete ✕ Cancel ✓ OK

Figura C-3: Definición de los espesores de la estructura del pavimento.

Pavement Layer Properties - Layer 1

Layer Thickness in

Linear Elastic Material Properties

Elastic Modulus, E psi

Damping Ratio %

Poisson's Ratio

Constant Poisson's Ratio

Poisson's Ratio from Model

Parameter a Parameter b

Calculated Poisson's Ratio from Model

Note :
 a and b are constants. Typical Values : a = -1.63 and b = 3.84E-6

Layer Temperature °F

✕ Cancel ✓ OK

Figura C-4: propiedades de la carpeta asfáltica.

Pavement Layer Properties - Layer 2

Layer 2 Thickness 8 in

Material

Standard Material Type A-1-a ▾

Range of E value is between 38500 - 42000.
Typical Value of E is 40000

Elastic Modulus, E 42,205 psi

CBR 80

R Value

E vs CBR Relationship

Poisson's Ratio 0.35

Damping Ratio %

Unit Weight lb/in³

Depth to Ground Water Table in
(Measured from the pavement surface)

Depth to Bed Rock in
(Measured from the last layer surface)

Figura C-5: propiedades de la base.

Pavement Layer Properties - Layer 3

Layer 3 Thickness in

Material

Standard Material Type

Range of E value is between 38500 - 42000.
Typical Value of E is 40000

Elastic Modulus, E psi

CBR

R Value

E vs CBR Relationship
 $E = 2555(CBR)^{0.65}$

Poisson's Ratio

Damping Ratio %

Unit Weight lb/in³

Depth to Ground Water Table in
(Measured from the pavement surface)

Depth to Bed Rock in
(Measured from the last layer surface)

Figura C-6: propiedades de la subbase.

Pavement Layer Properties - Layer 4

Layer 4 Thickness 0 in

Material

Standard Material Type A-1-a ▾

Range of E value is between 38500 - 42000.
Typical Value of E is 40000

Elastic Modulus, E 14457 psi

CBR

R Value

Poisson's Ratio 0.35

Damping Ratio %

Unit Weight lb/in³

Depth to Ground Water Table in
(Measured from the pavement surface)

Depth to Bed Rock in
(Measured from the last layer surface)

Figura C-7: propiedades de la subrasante.

Response Points - Static

Individual Response Points | Response Data Array | Graphical Display

Response Points Unit Converter : Length

No	X-Coordinate (in)	Y-Coordinate (in)	Z-Coordinate (in)	Layer No
1	5.103	5.103	2	1
2	5.103	5.103	3.96	1
3	5.103	5.103	8	2
4	5.103	5.103	16	3
5	5.103	5.103	20.08	4

In case where a response is needed at an interface :
 For the top layer : z = Depth of layer
 For the top of bottom layer : z = Depth of layer + 0.001 in

- Points generated automatically by program for Performance Analysis (Fixed Points)
- Points added by User and considered for Performance Analysis
- Points added by User but not considered for Performance Analysis

Vehicle Speed = 0 km/h (Static)

Layer 1
 Layer 2
 Layer 3

Traffic Direction
 Load
 Origin O (0,0,0)
 Response Points (X₀, Y₀, Z₀)
 X
 Y
 Z

Layer	Thickness (in)
Layer1 - Asphalt	4
Layer2 - Base	8
Layer3 - Subbase	8

L1 = 0.00 in Xc = 5.103 in Note:
 L2 = 0.00 in Yc = 5.103 in C = Center of Loaded Area
 S1 = 0.00 in Xe = 5.103 in E = Edge of Loaded Area
 Ye = 5.103 in Yc + Ye = Edge to Edge Contact Area Width
 Xc + Xe = Edge to Edge Contact Area Length

Figura C-8: definición de puntos de respuesta.

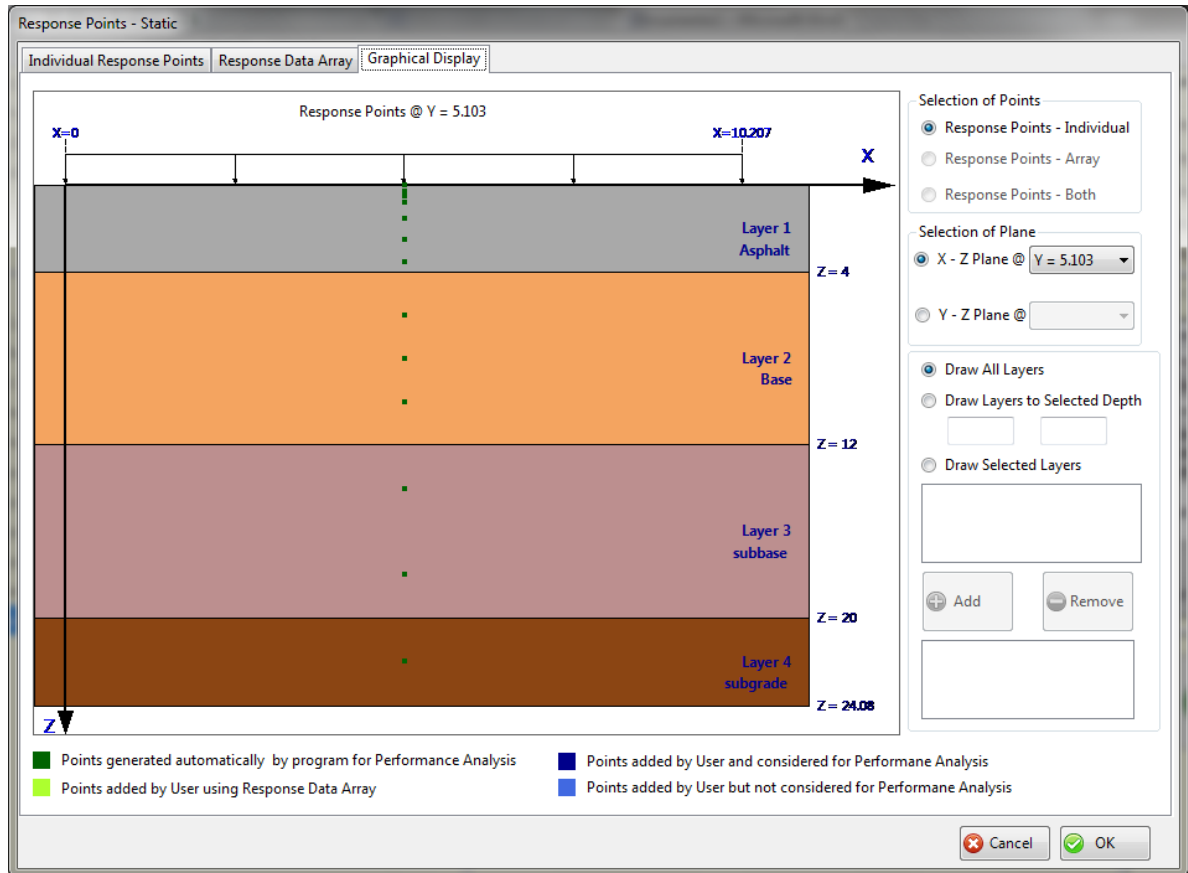


Figura C-9: vista grafica de la aplicación de la carga.

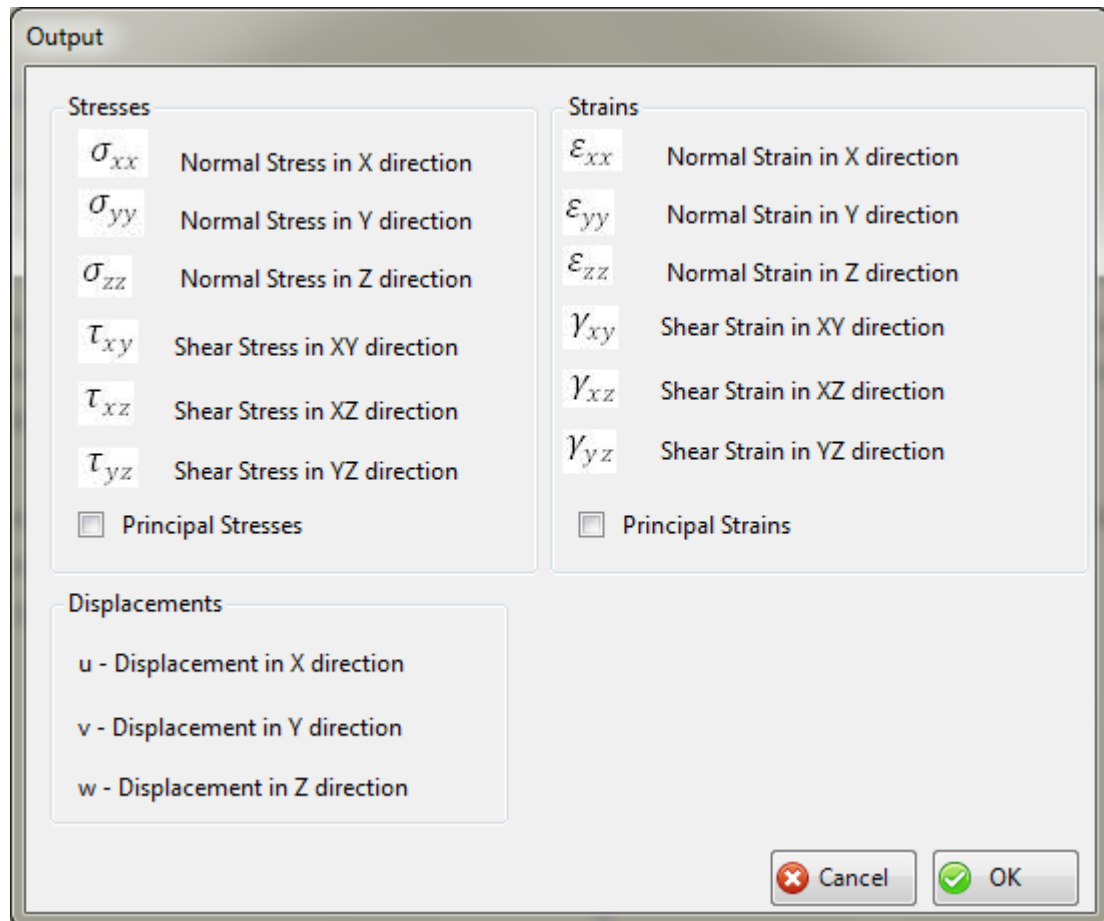


Figura C-10: nomenclaturas de salida.

ANEXO D: DATOS DE SALIDA, 3D-MOVE

Para cada una de las iteraciones realizadas, en CR-ME, es necesario encontrar los valores de deformación en la herramienta externa 3DMove, para lo cual se muestran los resultados de cada una de las iteraciones realizadas, los cuales hay que dividirlos entre 1E6 para poderlos introducir al CR-ME, ya que los resultados están en micropulgadas.

ITERACION 1

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	4
base	8
subbase	8
subrasante	semi-infinito

Tabla D-1: Espesores iteración 1

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	5.103	5.103	2	0.14545E+02	0.14544E+02	0.69950E+02
2	5.103	5.103	3.96	-0.19858E+03	-0.19930E+03	0.32774E+02
3	5.103	5.103	8	-0.16714E+03	-0.16739E+03	0.42331E+03
4	5.103	5.103	16	-0.13641E+03	-0.13648E+03	0.32286E+03
5	5.103	5.103	20.08	-0.12580E+03	-0.12584E+03	0.33059E+03

Tabla D-2: deformaciones, iteración 1

ITERACION 2.

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	4
base	8
subbase	10
subrasante	semi-infinito

Tabla D-3: espesores, iteración 2

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	5.103	5.103	2.5	-0.43454E+02	-0.43650E+02	0.76712E+02
2	5.103	5.103	4.95	-0.18016E+03	-0.18069E+03	0.54958E+03
3	5.103	5.103	9	-0.15343E+03	-0.15362E+03	0.36494E+03
4	5.103	5.103	18	-0.11468E+03	-0.11473E+03	0.26893E+03
5	5.103	5.103	23.1	-0.10069E+03	-0.10072E+03	0.26440E+03

Tabla D-4: Deformaciones, iteración 2

ITERACION 3.

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	5
base	8
subbase	10
subrasante	semi-infinito

Tabla D-5: Espesores, Iteración 3.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	5.103	5.103	2.5	-0.49517E+01	-0.50516E+01	0.47537E+02
2	5.103	5.103	4.95	-0.14720E+03	-0.14765E+03	0.15207E+03
3	5.103	5.103	9	-0.12162E+03	-0.12177E+03	0.29988E+03
4	5.103	5.103	18	-0.96460E+02	-0.96500E+02	0.23114E+03
5	5.103	5.103	23.1	-0.88305E+02	-0.88331E+02	0.23372E+03

Tabla D-6: deformaciones, Iteración 3

ITERACION 4

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	6
base	10
subbase	12
subrasante	semi-infinito

Tabla D-7: espesores, iteración 4.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	5.103	5.103	3	0.41226E+01	0.40780E+01	0.66113E+02
2	5.103	5.103	5.94	-0.12780E+03	-0.12813E+03	0.18657E+02
3	5.103	5.103	10	-0.97045E+02	-0.97152E+02	0.25039E+03
4	5.103	5.103	19	-0.79146E+02	-0.79174E+02	0.19799E+03
5	5.103	5.103	24.1	-0.65040E+02	-0.65055E+02	0.14936E+03

Tabla D-8: deformaciones, iteración 4.

ITERACION 5.

CAPA	ESPESOR (pulg)
Carp. Asfáltica	7
base	12
subbase	14
subrasante	semi-infinito

Tabla D-9: espesores, iteración 5.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro-Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro-Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro-Strain)
1	5.103	5.103	3.5	0.98667E+00	0.93097E+00	0.64269E+02
2	5.103	5.103	6.93	-0.10397E+03	-0.10420E+03	0.14866E+02
3	5.103	5.103	13	-0.69277E+02	-0.69325E+02	0.17130E+03
4	5.103	5.103	26	-0.50471E+02	-0.50481E+02	0.12068E+03
5	5.103	5.103	33.14	-0.45558E+02	-0.45565E+02	0.12064E+03

Tabla D-10: Deformaciones, Iteración 6.

ITERACION 6.

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	8
base	16
subbase	20
subrasante	semi-infinito

Tabla D-11: Espesores, Iteración 6.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro- Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro- Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro- Strain)
1	5.103	5.103	3	0.19065E+02	0.19034E+02	0.79165E+02
2	5.103	5.103	5.94	-0.37042E+02	-0.37121E+02	0.29470E+02
3	5.103	5.103	11	-0.66433E+02	-0.66505E+02	0.18568E+03
4	5.103	5.103	24	-0.47593E+02	-0.47604E+02	0.89747E+02
5	5.103	5.103	32.16	-0.33878E+02	-0.33883E+02	0.83414E+02

Tabla D-12: Deformaciones, Iteración 6

ITERACION 7.

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	10
base	18
subbase	20
subrasante	semi-infinito

Tabla D-13: Espesores, Iteración 7.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro- Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro- Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro- Strain)
1	5.103	5.103	5	-0.39379E+01	-0.39943E+01	0.55428E+02
2	5.103	5.103	9.9	-0.60756E+02	-0.60842E+02	0.83860E+01
3	5.103	5.103	19	-0.34525E+02	-0.34537E+02	0.85594E+02
4	5.103	5.103	38	-0.23911E+02	-0.23913E+02	0.57669E+02
5	5.103	5.103	48.2	-0.21325E+02	-0.21326E+02	0.57495E+02

Tabla D-14: Deformaciones, Iteración 7.

ITERACION 8.

CAPA	ESPESOR (pulg)
carp. Asfáltica	12
base	20
subbase	24
subrasante	semi-infinito

Tabla D-15: Espesores, Iteración 8.

Point No	X-Coord (in)	Y-Coord (in)	Z-Coord (in)	Normal Strain X-X (Micro- Strain)	Normal Strain Y-Y (Micro- Strain)	Normal Strain Z-Z (Micro- Strain)
1	5.103	5.103	6	-0.50078E+01	-0.50540E+01	0.48414E+02
2	5.103	5.103	11.8	-0.44144E+02	-0.44191E+02	0.61459E+01
3	5.103	5.103	22	-0.25329E+02	-0.25336E+02	0.62510E+02
4	5.103	5.103	44	-0.17007E+02	-0.17008E+02	0.41718E+02
5	5.103	5.103	56.24	-0.14969E+02	-0.14970E+02	0.41300E+02

Tabla D-16: Deformaciones, Iteración 8.